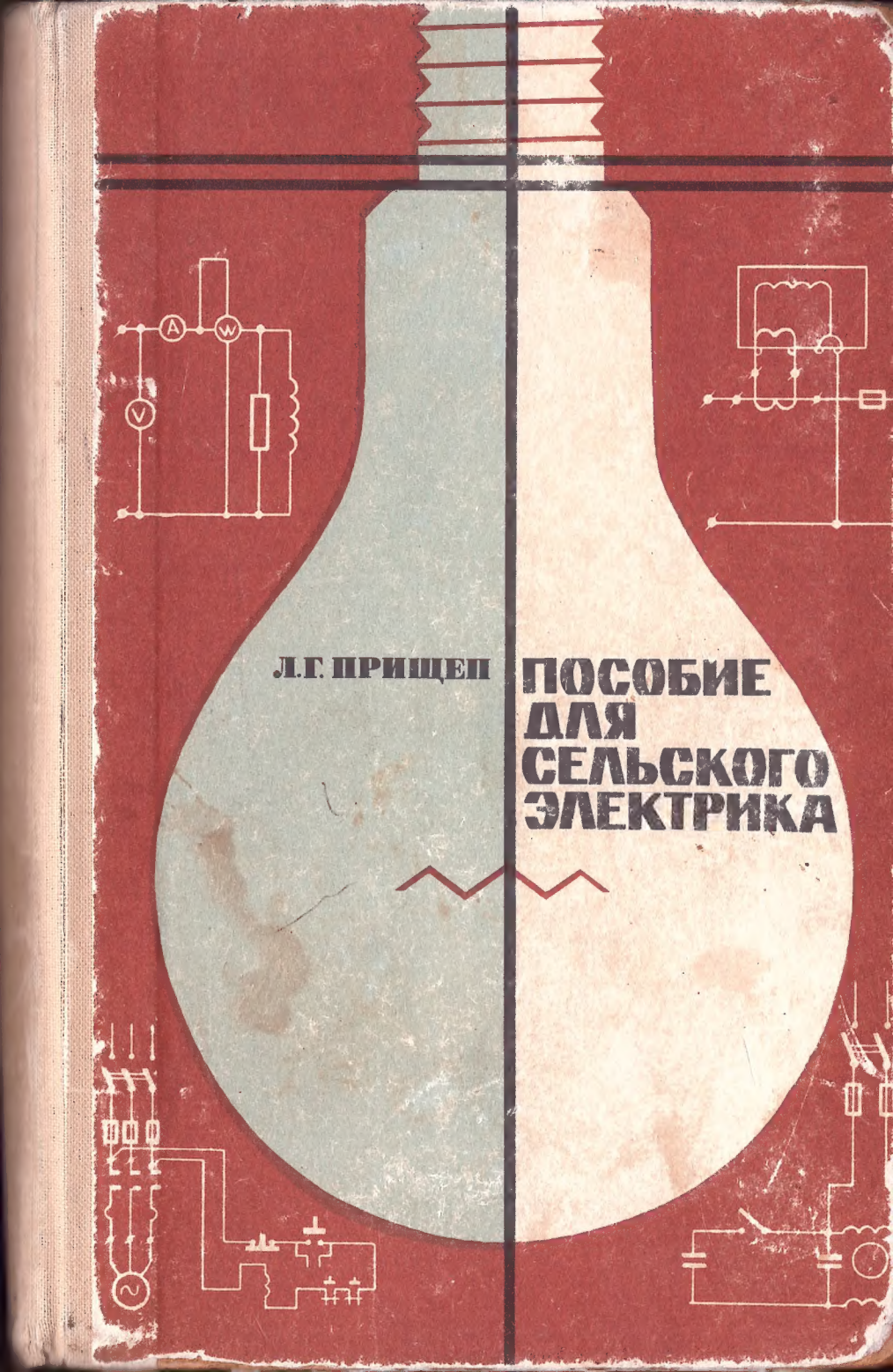

Л.Г. ПРИЩЕП
ПОСОБИЕ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИКА

Учебники и учебные пособия для подготовки сельскохозяйственных кадров массовой квалификации

Л. Г. ПРИЩЕП

ПОСОБИЕ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИКА

Издание 3-е, исправленное и дополненное

Одобрено Ученым советом Государственного комитета Совета Министров СССР по профессионально-техническому образованию в качестве учебного пособия для сельских профессионально-технических училищ

Издательство „КОЛОС"
Москва — 1969

УДК 621.3 + 631.371 : 621.311 (075.8)

В книге изложены вопросы практической электротехники, производства, распределения и применения электроэнергии в сельском хозяйстве.

В третьем издании внесены некоторые изменения в главу XV, а также сделаны отдельные уточнения и исправления в тексте по приборам и аппаратам.

Это учебное пособие предназначено для подготовки электромонтеров сельской электрификации в профессионально-технических училищах и может служить руководством для сельских электриков-практиков.

Замечания и отзывы просим направлять по адресу: Москва, К-31, ул. Дзержинского, 1/19, издательство «Колос».

Редактор инж. В. М. Никитина

4-2-4
15-БЗ-14-69

Введение

Перед социалистическим сельским хозяйством ставятся все более высокие требования по увеличению производства продуктов питания для населения и сырья для промышленности. Эти требования могут быть выполнены лишь на основе непрерывного совершенствования, а во многих случаях коренного изменения технологии сельскохозяйственного производства, использования самой передовой техники, энергетическую основу которой составляет электрическая энергия. Социалистическое сельскохозяйственное производство широко использует средства механизации и электрификации. Механизация производственных процессов на базе электрической энергии позволяет значительно повысить производительность труда, облегчить труд, увеличить производство сельскохозяйственной продукции и улучшить ее качество.

Коммунистическая партия и Советское правительство уделяют большое внимание развитию сельской электрификации. Реконструируются старые и строятся новые электрические линии для передачи электроэнергии в сельские районы от государственных энергосистем и крупных электростанций. Предусматривается строительство и расширение ряда предприятий по производству для колхозов, совхозов и других сельскохозяйственных предприятий комплектного автоматизированного силового электрооборудования, электронагревательных установок различного назначения, облучающих установок для животноводства, птицеводства, растениеводства. Намечена разработка и выпуск специальной сельскохозяйственной серии электродвигателей, специальных источников света, средств автоматизации. Расширяется выпуск и поставка сельскому хозяйству различных электроматериалов.

В. И. Ленин рассматривал электрификацию как необходимое условие построения коммунизма и указал пути ее развития.

Определяя основные задачи строительства коммунистического общества, партия руководствуется гениальной формулой В. И. Ленина: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны»*.

В настоящее время электрификация бурно развивается. В 1968 году выработка электроэнергии в стране составила около 640 млрд. *квт·ч*, а потребление ее в сельском хозяйстве — около 28 млрд. *квт·ч*. Государственным планом развития народного хозяйства на 1969 год предусмотрено увеличение выработки электроэнергии на 47 млрд. *квт·ч*, причем потребление ее в сельском хозяйстве возрастет на 11,5%.

Электроэнергия должна стать не только основой механизации трудоемких процессов, особенно в животноводстве, но и основой улучшения бытовых условий сельского населения. В быту сельского населения все более широкое применение находят электробытовые приборы и аппараты, телевизоры, радиоприемники, холодильники, стиральные машины. Вместе с тем повышается уровень культуры и улучшаются условия жизни тружеников села.

Наибольший эффект дает электрификация, полностью охватывающая как основные, так и вспомогательные производственные процессы с широким внедрением автоматизации в управление электроустановками. При такой электрификации ручной труд необходим только на работах, не требующих больших усилий и связанных с управлением машинами и установками. Поэтому значительно возрастает производительность труда и совершенствуется технология производства.

Затраты на электрификацию окупаются тем быстрее, а эффективность от нее тем больше, чем больше электрической энергии используется на производственные нужды, чем полнее загружены электростанции в течение всех суток, то есть чем выше коэффициент заполнения графика нагрузки.

Развитие электрификации в нашей стране идет нарастающими темпами. Вместе с развитием техники особое внимание должно уделяться подготовке высококвалифицированных кадров, способных успешно справиться с доверенной им техникой.

---

* В. И. Ленин. Соч., т. 31, изд. 4-е, стр. 484.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Глава I

Основы электричества. Электрические заряды. Электрическое поле

§ 1. Природа электричества. Электрические свойства веществ

Различные виды энергии являются проявлением различных форм движения материи. Энергия есть мера движения материи.

Механическая энергия проявляется при механическом движении тел, тепловая — при молекулярно-атомном движении, атомная — при ядерных реакциях внутри атомов, химическая — при химических реакциях веществ, электромагнитная — при электромагнитной форме движения материи.

В электротехнике под термином электрическая энергия понимают ту часть электромагнитной энергии, за счет которой в приборе, включенном в электрическую цепь, выделяется тепло, свет, происходит электролиз, появляется механическое усилие и т. д.

Понятие электричество определяет всю совокупность явлений, связанных с существованием, движением и взаимодействием электрических зарядов. В обиходе, однако, под «электричеством» часто понимают электрическую энергию, потребляемую от источников электрической энергии.

Всякое вещество состоит из химических элементов, которые представляют собой простые вещества, например водород, кислород, медь, алюминий. Соединения различных элементов представляют сложные вещества, например вода, кислота, окись меди и т. д.

В природе существует более 100 элементов.

Всякий элемент состоит из мельчайших частиц, обладающих свойствами данного элемента,— а т о м о в, которые уже не могут быть разложены на более мелкие частицы химическим путем. Атомы различных элементов отличаются атомным весом.

Мельчайшей частицей сложного вещества является м о л е к у л а, представляющая собой соединение атомов различных элементов. В молекулярном состоянии, когда два атома соединяются в одну молекулу, находятся газообразные элементы — водород, кислород и др. Атомы инертных газов — гелия, неона, аргона, криптона, ксенона — в молекулы не соединяются. Молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Число атомов у некоторых белковых веществ доходит до нескольких тысяч. Молекулы очень малы по своим размерам. Так, одна молекула водорода в поперечнике имеет 0,0000005 *мм*.

В свою очередь, атом сам является сложным образованием из э л е м е н т а р н ы х частиц вещества, уже не обладающих свойствами данного химического элемента. По современному представлению, в соответствии с э л е к т р о н н о й т е о р и е й с т р о е н и я в е щ е с т в а, атом имеет я д р о, вокруг которого вращаются э л е к т р о н ы. Ядро состоит из п р о т о н о в, н е й т р о н о в и э л е к т р о н о в. Как между солнцем и планетами в нашей солнечной системе существуют силы взаимного притяжения, так и между ядром атома и его электронами имеются силы притяжения. Они обусловлены разноименностью электрических зарядов ядра и электронов. Принято считать, что ядро заряжено положительно, а электрон отрицательно. Таким образом, электрон — это вещественная частица, обладающая самым малым наблюдаемым в природе отрицательным электрическим зарядом. Нейтроны, входящие в состав атомного ядра, не имеют заряда, а протоны имеют положительный заряд.

Атом каждого вещества имеет определенное число электронов, среди которых различают с в я з а н н ы е и с в о б о д н ы е. Связанные электроны не могут оторваться от атома. Они определяют физические свойства вещества. Свободные электроны могут легко отделяться от атома и переходить на другие атомы. Они могут быть выделены из вещества нагреванием, облучением, воздействием света и электрического поля. Свободные электроны

определяют электрические и химические качества вещества.

Высокая проводимость металлов объясняется наличием большого числа свободных электронов. Направленное движение потока свободных электронов вдоль металлического проводника называется электрическим током проводимости.

Металлы и сплавы металлов, обладающие свободными электронами и вследствие этого электронной проводимостью, называются электрическими проводниками первого рода. В электротехнике для изготовления проводников используют медь, алюминий, сталь.

К проводникам второго рода относятся жидкости, хорошо проводящие электричество. Это различные электролиты, например водные растворы серной кислоты H_2SO_4, едкого натра NaOH, медного купороса $CuSO_4$ и т. д. Во всяком электролите происходит распад молекул на составные части — разноименные ионы (диссоциация молекул) и одновременно с этим идет процесс воссоединения разноименных ионов в нейтральные молекулы (молизация молекул). Упорядоченное и направленное движение потока ионов в электролите под действием сил электрического поля называется ионным электрическим током.

Вещества, которые практически не проводят электричества, называются изоляторами, или диэлектриками. К ним относятся стекло, фарфор, эбонит, каучук, слюда, минеральные масла, кристаллы солей и т. д. Под действием сил электрического поля диэлектрик может поляризоваться, то есть электроны и ионы, находящиеся в связанном состоянии, ориентируются под действием поля, смещаясь на ничтожно малые расстояния, и создают свое электрическое поле. Эти связанные заряды не могут перемещаться, и их нельзя, например, отвести в землю. Однако созданное ими электрическое поле может воздействовать на конфигурацию внешнего поля, вызвавшего поляризацию.

Вещества, которые по своим свойствам электропроводимости занимают среднее положение между проводниками и изоляторами, называются полупроводниками. К ним относятся селен, кремний, германий, графит,

карборунд, сернистые соединения и т. д. Свойство электропроводимости зависит от рода примесей в основном материале полупроводника и от технологии его изготовления. Носители электрического тока в полупроводниках создаются воздействием тепла, света, потока электронов и других видов энергии от посторонних источников. В современной технике широкое распространение получили некоторые свойства полупроводников: выпрямление переменного тока (выпрямители с селеном, германием, кремнием, закисью меди и т. д.), повышение электропроводности и появление электродвижущих сил при освещении и облучении (фотоэлементы с кремнием, селеном, германием), изменение электропроводности в зависимости от степени освещенности (фотосопротивления с сернистым кадмием и др.) и от окружающей температуры (термисторы) и т. д.

Г а з ы в нормальном состоянии электричества не проводят, то есть являются диэлектриками. Однако при ионизации в результате отщепления электронов от нейтральных молекул газ становится способным проводить электричество. Ионизация газа может быть вызвана, например, рентгеновскими, радиоактивными и ультрафиолетовыми лучами.

§ 2. Системы единиц измерений электрических, магнитных и механических величин

При изучении электротехники приходится встречаться с измерением различных электрических, магнитных и механических величин. Измерение этих величин означает сравнение их с соответствующими им е д и н и ц а м и. Поскольку все электрические, магнитные и механические величины в физических явлениях и сложных процессах связаны между собой и зависят друг от друга, для их измерения приняты системы единиц. В основе системы МКСА лежат исходные единицы: метр (М), килограмм (К), секунда (С), ампер (А). В ранее применявшихся системах единиц СГСЭ и СГСМ в основе систем лежали: с а н т и м е т р (С), г р а м м (Г), с е к у н д а (С). Буква Э означает, что система электростатическая, а буква М — электромагнитная. С января 1963 г. введена новая Международная (интернациональная) система единиц измерения физических величин (СИ), единая, универсальная,

охватывающая все отрасли науки, техники и народного хозяйства. Эта система связывает воедино единицы измерения механических, тепловых, электрических, магнитных и других величин. Все основные и некоторые производные единицы, которые упоминаются в настоящей книге, приведены в таблице 1.

Другие единицы считаются устаревшими, и применять их не рекомендуется.

Производные от указанных единиц образуются делением или умножением их на единицу с нулями, а их наименования — прибавлением к простым наименованиям единиц соответствующих приставок: кило — (*к* — тысяча основных единиц, или 10^3), *гекто*— (*г* — сто основных единиц, или 10^2), *мега*— (*М*—10^6), *гига*— (*Г*—10^9), деци— (*д* — десятая часть, или 10^{-1}), *санти*— (*с* — сотая часть, или 10^{-2}), *милли*— (*м*—10^{-3}), *микро*— (*мк*—10^{-6}), *нано*— (*н*—10^{-9}), *пико*— (*п*—10^{-12}).

Чтобы не смешивать выражения физических законов с формулами размерности, абсолютные величины и формулы их размерности заключают в квадратные скобки.

Приведем соотношения между некоторыми единицами и их размерностями в различных системах. Так, в применявшейся ранее системе СГС (сантиметр, грамм, секунда) единица силы — дина (*дин*) равна 1 *см·г/сек*^{2} (1 *дин*$=$ $=1$ *г·*1 *см/сек*^{2}); единица работы — *эрг* равен 1 *см*$^2\cdot$ *г/сек*^{2} (1 *эрг*$=$1 *дин·*1 *см*). В системе МКС (метр, килограмм-сила, секунда) сила измерялась в килограммах (*кГ*), работа и энергия — в килограммометрах (*кГм*) и т. д. Соотношения между единицами и размерностями силы:

$$1\ н = 1\ кг\cdot 1\ м/сек^2 = \frac{1000\ г\cdot 100\ см}{1\ сек^2} = 10^3\ дин;$$

$$1\ н = \frac{10^5}{981\,000}\ кГ = 0{,}102\ кГ\ (\text{веса}).$$

Соотношения между единицами работы, энергии и количеством теплоты:

$$1\ дж = 1\ н\cdot 1\ м = 10^5\ дин\cdot 100\ см = 10^7\ эрг;$$

$$1\ кГм = \frac{1000}{427} = 2{,}34\ кал\ \text{тепла};$$

$$1\ дж = 1\ н\cdot 1\ м = 0{,}102\ кГ\cdot 1\ м = 0{,}102\,\frac{1000}{427} =$$

$$= 0{,}239\ кал\ \text{тепла}.$$

Таблица 1

ЕДИНИЦЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ СИ (по ГОСТ 9867—61)

Величина	Единица измерения	Сокращенные обозначения единиц		Размер производных единиц
		русские	латинские или греческие	
Основные единицы				
Длина	метр	*м*	m	—
Масса	килограмм	*кг*	kg	—
Время	секунда	*сек*	s	—
Сила электрического тока	ампер	*а*	A	—
Термодинамическая температура	градус Кельвина	°К	°K	—
Сила света	свеча	*св*	cd	—
Дополнительные единицы				
Плоский угол	радиан	*рад*	rad	—
Телесный угол	стерадиан	*стер*	sr	—
Производные единицы				
Частота	герц	*гц*	Hz	1:(1 *сек*)
Плотность	килограмм на кубический метр	*кг/м*^{3}	kg/m^3	(1 *кг*):(1 *м*)^3
Угловая скорость	радиан в секунду	*рад/сек*	rad/s	(1 *рад*):(1 *сек*)
Ускорение	метр на секунду в квадрате	*м/сек*^{2}	m/s^2	(1 *м*):(1 *сек*)^2
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	*рад/сек*^{2}	rad/s^2	(1 *рад*):(1 *сек*)^2

Продолжение

Величина	Единица измерения	Сокращенные обозначения единиц		Размер производных единиц
		русские	латинские или греческие	
Сила	ньютон	*н*	N	(1 *кг*)× ×(1 *м*):(1 *сек*)²
Давление (механическое напряжение)	ньютон на квадратный метр	*н/м²*	N/m²	(1 *н*):(1 *м*)²
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	*дж*	J	(1 *н*)·(1 *м*)
Мощность	ватт	*вт*	W	(1 *дж*):(1 *сек*)
Количество электричества	кулон	*к*	C	(1 *а*)·(1 *сек*)
Электрическое напряжение, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	вольт	*в*	V	(1 *вт*):(1 *а*)
Напряженность	вольт на метр	*в/м*	V/m	(1 *в*):(1 *м*)
Электрическое сопротивление	ом	*ом*	Ω	(1 *в*):(1 *а*)
Электрическая емкость	фарада	*ф*	F	(1 *к*):(1 *в*)
Поток магнитной индукции	вебер	*вб*	Wb	(1 *к*) (1 *ом*)= =(1 *в*) (1 *сек*)
Индуктивность	генри	*гн*	H	(1 *вб*):(1 *а*)
Магнитная индукция	тесла	*тл*	T	(1 *вб*):(1 *м*)²

Продолжение

Величина	Единица измерения	Сокращенные обозначения единиц		Размер производных единиц
		русские	латинские или греческие	
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	*а/м*	A/m	(1 *а*):(1 *м*)
Магнитодвижущая сила	ампер	*а*	A	(1 *а*)
Световой поток	люмен	*лм*	lm	(1 *св*)·(1 *стер*)
Яркость	свеча на квадратный метр или нит	*св/м*^{2} *нт*	cd/m^2 nt	(1 *св*):(1 *м*)^2
Освещенность	люкс	*лк*	lx	(1 *лм*):(1 *м*)^2

§ 3. Статический заряд тела и электрическое поле

Из физики известны опыты получения зарядов трением (электризация) эбонитового стержня о фланель (отрицательный заряд) или стеклянного стержня о шелк (положительный заряд). При соответствующих условиях любое вещество может быть заряжено путем трения о вещество другого рода.

Если при этом тело получает избыток электронов, то считают, что оно заряжено отрицательно. Если тело потеряло часть своих электронов, считают, что оно заряжено положительно.

Одноименные заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются. Сила взаимодействия зарядов определяется согласно закону Кулона: *два точечных заряда действуют друг на друга (притягиваются или отталкиваются) с силой, пропорциональной произведению величин зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними*, то есть

$$F = \frac{1}{\varepsilon} \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2}, \qquad (1)$$

где F — сила взаимодействия электрических зарядов ($н$);

q_1, q_2 — электрические заряды ($к$);

r — расстояние между зарядами ($м$);

ε — диэлектрическая проницаемость среды $\left(\frac{к}{в \cdot м} = \frac{ф}{м}\right)$.

Диэлектрическая проницаемость ε обычно выражается так:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0, \qquad (2)$$

где ε_0 — электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость свободного пространства, или вакуума);

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{ф}{м};$$

ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды, отвлеченное число, показывающее, во сколько раз диэлектрическая проницаемость среды больше диэлектрической проницаемости вакуума.

В таблице 2 приведены ε_r для ряда веществ.

Таблица 2

Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r некоторых веществ

Материал	ε_r	Материал	ε_r
Бакелит	3,8—5	Микапит	4,6—6
Бумага кабельная сухая	2,3—3,5	Мрамор	8—10
Бумага кабельная, пропитанная маслом	3,4—3,7	Оргстекло	3,2—3,6
Воздух	1	Парафин	2,2—2,3
Гетинакс	7—8	Резина	2,6—3,5
Карболит	3—5	Слюда	5—7,5
Лакоткань	3,5—5	Стекло	5,5—10
Масло трансформаторное	2—2,5	Тиконд	60—80
		Фарфор	5—7,5
		Фибра	3,5
		Тибар	6000—8000

Электрическое поле между двумя разноименно заряженными телами, например между двумя пластинами, тем сильнее, чем больше заряд на пластинах и чем меньше расстояние между ними.

Если электрическое поле создано совокупностью зарядов, которые можно считать практически неподвижными в пространстве, оно называется электростатическим полем («статический» означает — «неподвижный»). Электростатическое поле характеризуется потенциалом поля. Потенциал данной точки электростатического поля равновелик такой работе, которую надо затратить, чтобы переместить единицу заряда (1 *к*) из-за пределов поля в данную его точку. Потенциал измеряется в вольтах. Потенциал земли принято считать равным нулю. Сила электростатического поля стремится перемещать заряды от точки с более высоким потенциалом в точку с меньшим потенциалом. Если, например, потенциал точки A равен φ_A, а потенциал точки B равен φ_B, то между точками A и B действует напряжение

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \text{ в}, \qquad (3)$$

то есть напряжение равно разности потенциалов.

Воображаемые линии, по которым стремится двигаться положительный заряд, лишенный инерции, в электрическом поле, называются электрическими силовыми линиями.

Интенсивность электрического поля характеризуется напряженностью, обозначаемой буквой E. Напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр (*в/м*). Если напряжение между двумя параллельными металлическими пластинами с однородной диэлектрической средой между ними и заряженными разноименными зарядами равно U вольт, а расстояние между пластинами равно d метров, то напряженность электрического поля между пластинами

$$E = \frac{U}{d} \text{ в/м}. \qquad (4)$$

§ 4. Конденсаторы

Две параллельные металлические пластины, отделенные друг от друга диэлектриком (воздухом, бумагой, слоем стекла и т. д.) и находящиеся друг от друга на таком

расстоянии, что заряды одной пластины влияют на заряды другой, называются конденсатором (рис. 1). Если одну пластину конденсатора соединить с землей (заземлить), а на другой создать избыток электронов, то электроны с заземленной пластины, отталкиваясь, уйдут в землю, и эта пластина (рис. 2) окажется заряженной положительно.

Таким образом, на противоположных пластинах конденсатора останутся разноименные заряды, которые, притягиваясь друг к другу через диэлектрик, будут прочно

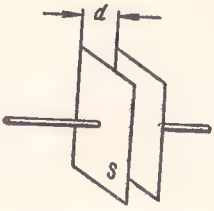


Рис. 1. Плоский конденсатор.

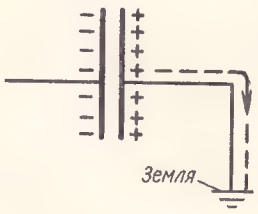


Рис. 2. Заряд конденсатора.

удерживаться в конденсаторе. Напряжение между землей и не соединенной с ней пластиной называют потенциалом по отношению к земле.

Каждый конденсатор обладает определенной емкостью, то есть способностью вмещать заряд определенной величины. Емкость плоского конденсатора C тем больше, чем больше площадь S $м^2$ пластины, чем больше диэлектрическая проницаемость ε $ф/м$ и чем меньше расстояние d $м$ между пластинами:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}\ ф. \qquad (5)$$

Единица для измерения емкости — фарада ($ф$). Однако широко используются и ее производные — микрофарада ($мкф$), пикофарада ($пф$):

$$1\ ф = 10^6\ мкф = 10^{12}\ пф.$$

Одна фарада — это емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на один вольт, если заряд увеличивается на один кулон. Заряд в один кулон — это количество электричества, которое протекает в 1 секунду через проводник при токе в 1 ампер.

Напряжение U на пластинах конденсатора с емкостью C будет тем больше, чем больше сообщенный ему заряд Q:

$$U = \frac{Q}{C} \quad \text{и} \quad C = \frac{Q}{U}. \tag{6}$$

Если конденсатор состоит из n пластин (соединенных между собой через одну), то его емкость определяется так:

$$C = (n-1) \cdot \frac{\varepsilon S}{d}. \tag{7}$$

В современной электротехнике и радиотехнике применяются конденсаторы переменной и постоянной емкости. По типу диэлектрика они подразделяются на воздушные, бумажные, слюдяные, керамические и электролитические. В паспорте конденсатора указываются его марка, номинальная емкость, рабочее напряжение, класс точности (нулевой $\pm 2\%$, первый $\pm 5\%$, второй $\pm 10\%$, третий $\pm 20\%$; здесь цифра означает допустимые отклонения фактической емкости от номинальной).

Воздушные конденсаторы имеют алюминиевые пластины. Воздушные конденсаторы постоянной емкости применяются редко из-за их громоздкости. В частности, для радиоприемо-передающих устройств нашли применение переменные воздушные конденсаторы емкостью от 10 до 600 *пф*.

В бумажных конденсаторах (КБ, КБГ, БМ, БГМ и т. д., где Г означает — герметизированный, М — малогабаритный) в качестве диэлектрика используется специальная тонкая конденсаторная бумага, пропитанная изоляционным составом. Обкладками служат две ленты из тонкой металлической фольги. Они свернуты в рулон, вложены в металлический корпус и залиты изоляционным составом.

Широкое применение имеют также металлобумажные конденсаторы типа МБГ, МБМ и др. Обкладки у них наносятся на бумажные ленты, пропитанные изоляционным составом, на тонкий слой лака путем распыления металла (металлизацией). Такая обкладка имеет очень малую толщину.

Рабочее напряжение таких конденсаторов 200—1500 *в*, а емкость — от сотен пикофарад до нескольких микрофарад.

В слюдяных конденсаторах между обкладками из фольги прокладывают тонкие слюдяные пластинки или наносят на них тончайший слой серебра (металлизацией). Эти конденсаторы выполняют постоянной емкостью от десятков до десятков тысяч пикофарад на рабочее напряжение до нескольких тысяч вольт. Марки их расшифровываются следующим образом: КСО — конденсатор слюдяной опрессованный, КСГ — конденсатор слюдяной герметизированный и т. д.

В керамических конденсаторах диэлектриком является высококачественная керамика: ультрафарфор, тиконд, ультрастеатит и др. Обкладкой служит слой серебра, нанесенный на поверхность керамики металлизацией. Емкость их постоянная и находится в пределах от единиц до нескольких сотен пикофарад. Марки расшифровываются так: КДК — конденсатор дисковый керамический, КТК — конденсатор трубчатый керамический, КГК — конденсатор герметизированный в фарфоровых трубках и т. д.

Наряду со слюдяными и керамическими сейчас применяются пленочные конденсаторы, в которых диэлектриком служат полистироловые и фторопластовые пленки (конденсаторы МПГ — металлопленочные герметизированные, ПМ — полистироловые малогабаритные и т. д.).

В электролитических конденсаторах (КЭ, ЭМ — малогабаритном и др.) диэлектриком служит тонкий слой окиси, нанесенный на ленту из тонкой фольги электролитическим способом. Другая обкладка (катод) образуется из пропитанной электролитом и плотно прилегающей к покрытой окисью поверхности фольги бумажной ленты. При включении электролитического конденсатора нужно обязательно соблюдать полярность. Стакан — корпус, являющийся катодом, надо соединять с отрицательным полюсом в схеме, а анод — с положительным. При неправильном соединении возникает электролиз в обратном направлении, слой окиси на аноде исчезает, и конденсатор выходит из строя. Таким образом, электролитические конденсаторы могут работать только в цепях постоянного или пульсирующего тока одного направления.

Емкость электролитических конденсаторов может быть очень велика — до нескольких тысяч микрофарад, при

относительно малых габаритных размерах самого конденсатора. Это объясняется тем, что расстояние между обкладками конденсатора (электролит-анодная лента) очень мало. Недостатком электролитических конденсаторов является непостоянство их емкости, зависящей от температуры и приложенного напряжения. Кроме того, слой окиси не является совершенным диэлектриком, и часть зарядов переходит с одной обкладки на другую через слой диэлектрика.

Конденсаторы, которые меняют свою емкость в зависимости от приложенного к их обкладкам напряжения, называют в а р и к о н д а м и. Их изготавливают со специальным диэлектриком из сегнетокерамического материала. Вариконды типа ВК1-0, ВК1-1 меняют свою емкость в зависимости от приложенного напряжения в 4—6 раз. Их применяют для усиления постоянного и переменного тока, умножения частоты, стабилизации напряжения и т. д. в устройствах автоматики и телемеханики.

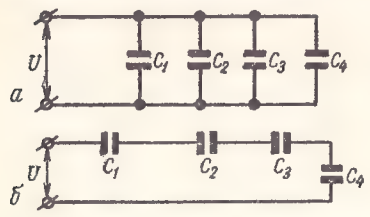


Рис. 3. Параллельное (*а*) и последовательное (*б*) соединение конденсаторов.

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 3,*а*) общая емкость батареи $C_{об}$ равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{об} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4. \qquad (8)$$

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 3, *б*) величина, обратная общей емкости, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{об}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}. \qquad (9)$$

§ 5. Разряд конденсатора. Электрическая прочность диэлектрика

Если обе обкладки конденсатора соединить между собой через сопротивление большой величины, то заряды на них выравняются через промежуток времени, тем больший, чем больше величина сопротивления, а следовательно, чем

меньше сила тока, протекающего с одной обкладки конденсатора на другую. Если обкладки соединить накоротко или через малое сопротивление, то разряд конденсатора произойдет мгновенно и будет сопровождаться искрой. Если напряжение на обкладках конденсатора будет увеличиваться, то может наступить момент, когда разряд произойдет через диэлектрик, находящийся между пластинами конденсатора. Это явление называется *пробоем диэлектрика*. Последний теряет при этом свои первоначальные свойства.

Каждому диэлектрику соответствует определенное *пробивное напряжение*, или *электрическая прочность*, выраженная в *кв/см*. В таблице 3 приведены данные электрической прочности материалов.

Таблица 3

Электрическая прочность материалов

Диэлектрик	Электрическая прочность (*кв/см*)
Бумага кабельная сухая	60—90
Бумага, пропитанная маслом	100—250
Воздух	30
Масло трансформаторное	50—180
Миканит	150—300
Мрамор	35—55
Парафин	150—300
Полихлорвинил	100—500
Слюда	600—2000
Стекло	100—400
Резина	150—250
Фарфор	180—250
Эбонит	80—100
Эмаль	230

Так, для воздуха пробивное напряжение равно 30 *кв* на 1 *см*. Если к обкладкам воздушного конденсатора подвести напряжение из расчета 30 *кв/см*, то произойдет искровой разряд конденсатора через воздух, т. е. пробой диэлектрика.

Грозовые явления — молния и гром в природе — это колоссальный разряд через воздух естественного конден-

сатора, образованного грозовой тучей и землей или двумя грозовыми тучами.

Для того чтобы отвести заряды грозового облака в землю, устанавливают молниеотводы (см. гл. XXII).

§ 6. Статическое электричество

Внешняя броня электрического кабеля, металлические корпуса и кожухи приборов также являются обкладками конденсаторов; другой обкладкой для них служат токоведущие жилы или катушки приборов. Если на кабель или приборы подается напряжение, то броня или кожухи заряжаются электричеством, противоположным по знаку электричеству в токоведущих частях. При выключении электрического тока эти заряды могут остаться как на внешних оболочках, так и на внутренних токоведущих частях. Они представляют весьма существенную угрозу обслуживающему персоналу. Это одна из причин, по которой все кожухи и корпуса высоковольтных электрических приборов необходимо заземлять, то есть соединять с землей. При работе с выключенными высоковольтными устройствами (трансформаторами, линиями воздушными и кабельными) необходимо заземлять токоведущие части, провода и жилы.

Статическое электричество возникает также при трении ремней о шкивы приводимых машин. Если, например, приводимая машина изолирована от земли деревянной рамой, то благодаря постоянному трению ремня о шкив корпус машины заряжается статическим электричеством. Этот заряд может представить весьма серьезную угрозу обслуживающему персоналу, а также вызвать искрение и пожар.

Во избежание несчастных случаев необходимо заземлять корпуса машин, имеющих ременную передачу, даже в том случае, когда приводной двигатель — тепловой или конный.

Потенциал по отношению к земле могут приобретать корпуса автомобилей при движении на больших скоростях по изолирующим покрытиям дорог. При этом затрудняется радиоприем и создается опасность взрыва емкостей с горючим. Электризуются сиденья и спинки от соприкосновения одежды пассажира и обивочной ткани.

Статическое электричество причиняет большой вред на сахарных заводах, мельницах и других сельскохозяйственных предприятиях. Электризация существует везде, где происходит движение, трение, сжатие, дробление и т. д.

Для борьбы со статическим электричеством, кроме обычного заземления, которое в ряде случаев может оказаться малоэффективным, разрабатывается ряд способов.

Одним из наиболее перспективных способов является ионизация воздуха, окружающего наэлектризованный материал (см. гл. XXVI). Заряды из воздуха оседают на материале и нейтрализуют его заряд.

Но статическое электричество можно использовать для высококачественной окраски изделий, очистки воздуха от пыли и продуктов сгорания, попадающих в атмосферу из заводских труб, и для других целей. При этом необходимо иметь специальный источник статического электричества.

Глава II

Постоянный ток

§ 1. Электрическая цепь постоянного тока. Закон Ома

Электрической цепью называется замкнутый путь, по которому переносятся электрические заряды, состоящий из источника энергии (например, аккумулятора), приемника энергии (например, электрической лампы) и двух соединяющих их проводов. По одному из проводов заряды идут от источника к токоприемнику, а по другому возвращаются от токоприемника к источнику. Скорость распространения электрической энергии в цепи около 300 тыс. *км/сек*.

Электрическая энергия вырабатывается за счет химической, механической и других видов энергии. На положительном и отрицательном полюсах источника энергии получаются различные уровни электрических зарядов, которые стремятся выравняться через электрическую цепь, подобно тому, как стремятся выравняться уровни воды в различных сосудах, соединенных между собой

трубкой. Сила, с которой заряды стремятся к выравниванию, называется напряжением.

Таким образом, если соединить проводником два тела с различными зарядами (например, две обкладки заряженного конденсатора), то под действием приложенного напряжения по проводнику будет протекать ток до выравнивания зарядов.

Электродвижущей силой, или э. д. с., называется напряжение на зажимах источника при отсутствии тока в цепи, то есть при разомкнутой внешней цепи.

В источнике энергии, который можно назвать также источником электродвижущей силы или генератором тока, разница в уровнях зарядов на полюсах поддерживается постоянно. Поэтому электрический ток в цепи протекает постоянно до тех пор, пока цепь тока замкнута. Направление тока во внешней цепи принято считать от положительного полюса (+) к отрицательному (—), то есть от верхнего уровня к нижнему. Сила тока на всех участках цепи одинакова (рис. 4). Она зависит

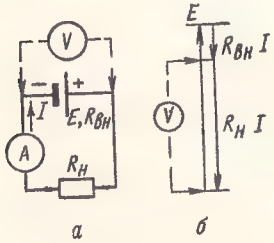


Рис. 4. Замкнутая цепь (*а*) и графическое изображение распределения напряжений и э. д. с. (*б*):
E — э. д. с. источника; $R_н$ — внешнее сопротивление цепи; $R_{вн}$ — внутреннее сопротивление источника тока; V — вольтметр; A — амперметр.

от величины э. д. с. E (*в*) источника и сопротивления R (*ом*) — величины, характеризующей противодействие электрической цепи току, и определяется законом Ома, выражающим зависимость между напряжением, силой тока и сопротивлением:

$$I = \frac{E}{R}. \qquad (10)$$

Величина сопротивления всей цепи R равна сумме сопротивления наружного (внешнего) участка цепи $R_н$ и внутреннего сопротивления источника тока $R_{вн}$:

$$R = R_н + R_{вн}.$$

Таким образом, ток преодолевает сопротивление не только во внешней цепи, но и внутри источника, при переходе от одного полюса источника к другому.

Закон Ома может быть применен не только ко всей цепи, но и к отдельным ее участкам. Так, для электрической цепи, изображенной на рисунке 5, можно написать

$$I = \frac{U_1}{R_1}; \quad I = \frac{U_2}{R_2}; \quad I = \frac{U_3}{R_{вн}}, \tag{11}$$

где I — сила тока в цепи;

U_1 — напряжение (или падение напряжения) на сопротивлении R_1;

U_2 — напряжение на сопротивлении R_2;

U_3 — падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока $R_{вн}$.

Сумма напряжений на отдельных участках цепи равна электродвижущей силе (э. д. с.) источника:

$$U_1 + U_2 + U_3 = E. \tag{12}$$

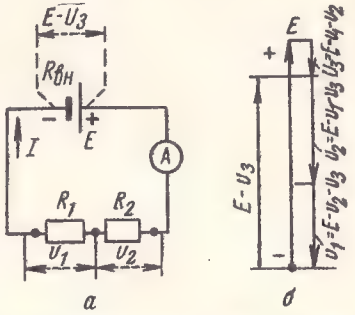


Рис. 5. Замкнутая цепь (*а*) и графическое изображение распределения напряжений на элементах цепи (*б*).

На рисунках 4, *б* и 5, *б* приведены графические изображения действующих в цепи напряжений, причем длина отрезков, представляющих напряжения, пропорциональна их величинам (отрезки взяты в масштабе), а стрелками указано направление действия напряжений. Такие направленные отрезки, взятые в масштабе, называются в е к т о р а м и, а графическое изображение с их помощью напряжений и токов, действующих в цепи,— в е к т о р н о й д и а г р а м м о й.

Если сопротивление внешней цепи $R_н$ стало небольшим по сравнению с внутренним сопротивлением источника и можно считать, что оно равно нулю, то в цепи возникает режим к о р о т к о г о з а м ы к а н и я источника энергии. Сила тока $I_к$ при этом может достигать очень больших значений, так как $R_{вн}$ во много раз меньше сопротивлений токоприемников. Сила тока короткого замыкания:

$$I_к = \frac{E}{R_{вн}}.$$

Короткое замыкание происходит, например, при повреждении изоляции, когда провода, идущие от источника тока к токоприемнику, соединяются (замыкаются) между собой.

Закон Ома может быть записан в трех выражениях:

$$I = \frac{U}{R}; \quad U = IR; \quad R = \frac{U}{I}. \qquad (13)$$

В таком виде закон Ома применим только к цепям постоянного тока и цепям переменного тока с активным сопротивлением (лампы накаливания, нагревательные приборы). Активным называется такое сопротивление, в котором происходит необратимый процесс превращения электрической энергии в другой вид энергии (тепло, свет и т. д.).

В формулах (10) и (11) напряжение и э. д. с. измеряются в вольтах (*в*), сила тока — в амперах (*а*), а сопротивление — в омах (*ом*).

Величину ампера установили по химическому действию тока. При токе в 1 *а* из раствора азотнокислого серебра (ляписа) выделяется и откладывается на электроде 1,118 *мг* серебра в секунду. Сопротивление в 1 *ом* — это сопротивление ртутного столбика длиной 106,3 *см* и с поперечным сечением 1 *мм*^{2} при 0°. Напряжение в 1 *в* создается на сопротивлении в 1 *ом* при протекании тока в 1 *а*. Конкретное представление о различных величинах тока, напряжения и сопротивления можно получить из следующих данных.

Электрические лампочки, широко применяемые в быту, потребляют ток в 0,2—1 *а*, а их сопротивление составляет 1000—200 *ом*; через паяльник и утюг течет ток в 2—5 *а*, а сопротивление их нагревательных элементов 100—40 *ом*; ток, сжигающий медный провод диаметром 0,1 *мм*,— 3 *а*; при подъеме трамвая в гору ток в его двигателе равен 100 *а*; человек начинает ощущать ток с 0,0005 *а*. Сопротивление трамвайного рельса длиной около 20 *км* составляет 1 *ом*.

Напряжение в осветительной сети — 127 или 220 *в*; напряжение между контактным проводом трамвая и рельсом — около 600 *в*; это же напряжение на электрифицированных железных дорогах равно 3300 *в* (постоянный ток), или 27,5 *кв* (переменный однофазный ток).

§ 2. Постоянный ток в электролитах. Электролиз. Гальванотехника

Молекулы электролита под действием растворителя распадаются на положительные и отрицательные ионы. Ионы водорода или металла имеют положительный заряд, а неметаллический остаток молекулы электролита — отрицательный заряд.

Так, под действием растворителя (например, воды) молекула поваренной соли NaCl распадается на положительный ион натрия (Na^+) и отрицательный ион хлора (Cl^-); молекула медного купороса $CuSO_4$ — на положительный ион меди (Cu^+) и отрицательный ион (SO^-_4) и т. д.

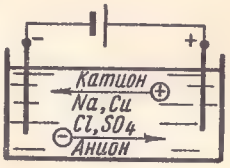


Рис. 6. Схема электролиза.

Если в электролит опустить два электрода (рис. 6) и приложить к ним напряжение, то под действием электрического поля к отрицательному электроду — к а т о д у — будут перемещаться положительные ионы, которые называют к а т и о н а м и, а к положительному электроду — а н о д у — будут перемещаться отрицательные ионы, которые называют а н и о н а м и. Достигая электрода, ионы отдают ему свой заряд и либо вступают с ним в химическую реакцию, либо оседают на нем. Процесс выделения вещества электролита на электродах называется э л е к т р о л и з о м.

Электролиз широко используют в технике для получения металлов из их соединений, отделения металлов от примесей, нанесения металлических покрытий на металлические предметы и получения металлических копий с неметаллических предметов (гальванотехника).

Г а л ь в а н о т е х н и к а открыта русским ученым Б. С. Якоби в 1840 г. Она делится на г а л ь в а н о п л а с т и к у — получение легко отделяющихся металлических точных копий с различных предметов и г а л ь в а н о с т е г и ю — получение на изделиях из металла тонких покрытий из других металлов, например не поддающихся коррозии.

Для нанесения металлического покрытия изделие (катод) соединяют с отрицательным полюсом источника энергии и погружают в электролит, содержащий поло-

жительные ионы осаждающегося металла. Анодом служат пластины или прутки из того металла, которым покрывают изделие. В некоторых случаях используют и нерастворимые аноды. Тогда на изделии (положительный полюс источника) выделяются атомы кислорода, окисляющие поверхность металлического изделия.

Изделие предварительно очищают от ржавчины, окалины, смазок, жиров и пр., подвергая его механической очистке (шлифовке, полировке и т. д.), электрохимическому обезжириванию (в щелочном электролите), травлению (в щелочных или кислотных электролитах).

К наиболее распространенным металлическим покрытиям относятся: цинкование для защиты черных металлов (толщина слоя покрытия от 10 до 50 микрон); кадмирование изделий из стали, чугуна, меди и ее сплавов (5—50 микрон); лужение — покрытие оловом (4—25 микрон); свинцование изделий, соприкасающихся с серной кислотой или соединениями серы (75—150 микрон); меднение железа или стали (от 5 микрон до 3 *мм*); никелирование (10—150 микрон); хромирование изделий из стали, никеля, меди, латуни (до 3 *мм*); серебрение и золочение. Металлические пленки на детали наносят в электролитических ваннах при напряжении от 6 до 12 *в*. Плотность тока от 1 до 10 *а* на 1 $дм^2$ поверхности покрываемой детали. Оксидирование (покрытие изделий из алюминия, его сплавов и сплавов из магния пленкой окислов) выполняют при напряжении до 60 *в*.

§ 3. Параллельное и последовательное соединение сопротивлений

На рисунке 7, *а* и *в* представлено параллельное соединение двух и трех сопротивлений, а на рисунке 7, *б* — последовательное соединение трех сопротивлений. При параллельном соединении концы сопротивлений сходятся в общие узловые точки, и каждое сопротивление оказывается включенным на общее напряжение, приложенное к этим узловым точкам *А* и *В* (рис. 7, *а*) и *С* и *Д* (рис. 7, *в*). При последовательном соединении сопротивления включают одно за другим, то есть начало последующего соединяют с

концом предыдущего. Электрический ток в цепи с последовательным соединением — общий для всех сопротивлений.

Цепи, изображенные на рисунке 7, *а* и *в*, относятся к разветвленным цепям, в которых имеются точки, где сходятся три и более проводников (точки *А*, *В*, *С*, *Д*). Эти точки называются узлами. Участки цепи, соединяющие два узла (*А* и *В*, *С* и *Д*), называются ветвями цепи. При установившемся электрическом токе количество электричества, притекающего в единицу времени к узлу, равно количеству электричества, утекающего от узла за тот же период, то есть сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла, или

$$\Sigma I = 0. \qquad (14)$$

Это равенство является выражением первого правила Кирхгофа, которое гласит: алгебраическая сумма токов в разветвлении равна нулю.

В соответствии с этим законом для точки *В* (рис. 7, *а*) имеем

$$I_1 + I_2 - I_{об} = 0, \qquad (15)$$

или

$$I_1 + I_2 = I_{об}. \qquad (16)$$

Для точки *Д*

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{об}. \qquad (17)$$

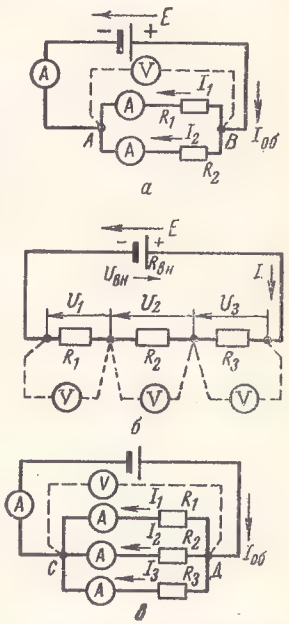


Рис. 7. Параллельное (*а* и *в*) и последовательное (*б*) соединение сопротивлений.

Общее сопротивление цепи при параллельном соединении определяют следующим образом. Для каждой из цепей между точками *А* и *В* (рис. 7, *а*) по закону Ома можно написать

$$U = I_1 R_1 \text{ или } I_1 = \frac{U}{R_1}; \qquad (18)$$

$$U = I_2 R_2 \text{ или } I_2 = \frac{U}{R_2}, \qquad (19)$$

где U — напряжение между точками A и B, замеренное вольтметром.

Если общее сопротивление параллельных цепей между A и B записать как $R_{об}$, а общий ток $I_{об}$ как сумму, то по закону Ома

$$U = I_{об} R_{об} = (I_1 + I_2) R_{об}, \tag{20}$$

или

$$I_1 + I_2 = \frac{U}{R_{об}}. \tag{21}$$

Складывая левые и правые части формул (18) и (19), получают

$$I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}. \tag{22}$$

Из формул (21) и (22) следует:

$$\frac{U}{R_{об}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}. \tag{23}$$

Сократив U, получают

$$\frac{1}{R_{об}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \tag{24}$$

или

$$R_{об} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \tag{25}$$

Величина, обратная сопротивлению $\left(\frac{1}{R}\right)$, называется проводимостью. Из формулы (24) следует, что общая проводимость параллельного соединения цепей равна сумме проводимостей отдельных параллельных цепей.

Проводимость между точками C и $Д$ (рис. 7, *в*)

$$\frac{1}{R_{об}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \tag{26}$$

или

$$R_{об} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}. \tag{27}$$

Если $R_1 = R_2 = R_3 = R$,
то

$$R_{об} = \frac{R^3}{R^2 + R^2 + R^2} = \frac{R^3}{3R^2} = \frac{R}{3}. \tag{28}$$

Если параллельно соединено n равных между собой сопротивлений R, то общее сопротивление

$$R_{об} = \frac{R}{n}. \qquad (29)$$

Второе правило Кирхгофа гласит: *в замкнутой электрической цепи алгебраическая сумма э. д. с. равна алгебраической сумме падений напряжений на отдельных сопротивлениях.*

Согласно этому правилу, для схемы, изображенной на рисунке 7, *б*, можно записать:

$$E = U_{вн} + U_1 + U_2 + U_3. \qquad (30)$$

Если это уравнение разделить на общий ток I в цепи, то

$$\frac{E}{I} = \frac{U_{вн}}{I} + \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I} = R_ц,$$

или

$$R_ц = R_{вн} + R_1 + R_2 + R_3, \qquad (31)$$

то есть при последовательном соединении сопротивлений общее сопротивление цепи равно сумме составляющих ее сопротивлений.

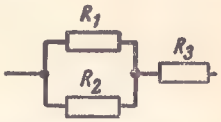


Рис. 8. Смешанное соединение сопротивлений.

При смешанном соединении сопротивлений (рис. 8) прежде всего определяют сопротивление участка цепи с параллельными ответвлениями, а затем суммарное:

$$R_{об} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3.$$

§ 4. Расчет сопротивлений

Каждый токоприемник (электрический прибор, электролампа, нагревательный прибор и др.) характеризуется электрическим сопротивлением. Электрическое сопротивление веществ зависит от содержания в них свободных электронов. Способность того или иного материала проводить электричество оценивают по удельному сопротивлению ρ или его обратной величине — удельной проводимости $\gamma = \frac{1}{\rho}$. Удельным сопротивлением материала называют сопротивление проводника из данного материала длиной 1 *м* и сечением 1 *мм*^{2} при 20° С.

Таблица 4

Удельное сопротивление металлов и сплавов и область их применения

Наименование материала	Удельное сопротивление при 20° (ом·мм²/м)	Область применения
Металлы		
Серебро	0,0160—0,0162	Контакты электроприборов и аппаратов
Медь	0,0175—0,0182	Провода, кабели и шины
Алюминий	0,0263—0,0288	То же
Вольфрам	0,053—0,055	Нити ламп накаливания, нагревостойкие электроды в лампах, контакты
Цинк	0,0535—0,0625	Антикоррозийные покрытия, электроды в гальванических элементах, контакты
Никель	0,0703—0,0790	Катоды, аноды и сетки в электронных лампах
Сталь	0,103—0,137	Провода, кабели и шины, конструктивный материал
Свинец	0,217—0,222	Защитные оболочки кабелей, вставки предохранителей, пластины аккумуляторов
Ртуть	0,958	Электроды в терморегуляторах, ртутных выпрямителях
Сплавы		
Бронза	0,0210—0,052	Контакты, пружины
Латунь	0,031—0,079	Контакты, зажимы
Нейзильбер (медь, цинк, никель, железо)	0,30—0,45	Реостаты
Манганин (медь, марганец, никель, железо)	0,42—0,50	Эталонные сопротивления, магазины сопротивлений
Константан (медь, никель)	0,45—0,52	Реостаты и сопротивления, нагревательные элементы до 450°
Нихром (хром, никель, железо)	1,02—1,27	Электропечи с температурой до 1000°
Фехраль (железо, хром, алюминий)	1,1—1,25	Бытовые нагревательные приборы и электропечи с температурой до 650°

В таблице 4 приведены удельные сопротивления и проводимости некоторых, наиболее широко распространенных в электротехнике материалов.

Как видно из таблицы, лучшими проводниками являются серебро и медь, затем алюминий и различные сплавы. Для нагревательных элементов тепловых приборов используют сплавы с высоким удельным сопротивлением — нихром, фехраль и др.

Сопротивление провода R *ом*, длиной l *м*, поперечным сечением S *мм*^{2} определяют по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S}, \qquad (32)$$

где ρ — удельное сопротивление;

γ — удельная проводимость.

По формуле (32) определяют размерность удельного сопротивления:

$$[\rho] = \left[R \frac{S}{l}\right] = ом \cdot мм^2/м.$$

Если задан диаметр провода, то его сечение находят так:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}, \qquad (33)$$

где D — диаметр провода (*мм*);

$\pi = 3{,}14$.

Если известно сопротивление провода и его материал, а также один из геометрических параметров — длина или сечение, то из формулы (32) можно определить второй параметр — сечение или длину:

$$l = \frac{RS}{\rho}; \quad S = \frac{\rho l}{R}. \qquad (34)$$

§ 5. Влияние нагрева на величину сопротивления

Удельное сопротивление металлов при нагревании увеличивается в результате увеличения скорости движения атомов в материале проводника с возрастанием температуры. Удельное сопротивление электролитов и угля при нагревании, наоборот, уменьшается, так как у этих материалов, кроме увеличения скорости движения атомов и молекул, возрастает число свободных электронов и ионов в единице объема.

Некоторые сплавы, обладающие бо́льшим удельным сопротивлением, чем составляющие их металлы, почти не меняют удельного сопротивления с нагревом (константан, манганин и др.).

Величина, показывающая относительное увеличение сопротивления при нагреве материала на 1° (или уменьшение при охлаждении на 1°), называется температурным коэффициентом сопротивления. Если температурный коэффициент обозначить через α, удельное сопротивление при $t_0=20°$ через ρ_0, то при нагреве материала до температуры t_1 его удельное сопротивление

$$\rho_1=\rho_0+\alpha\rho_0(t_1-t_0)=\rho_0[1+\alpha(t_1-t_0)] \qquad (35)$$

и соответственно

$$R_1=R_0[1+\alpha(t_1-t_0)]. \qquad (36)$$

Температурный коэффициент α для меди, алюминия, вольфрама равен 0,004 *1/град*. Поэтому при нагреве на 100° их сопротивление возрастает на 40%. Для железа $\alpha=0{,}006$ *1/град;* для латуни $\alpha=0{,}002$ *1/град;* для фехрали $\alpha=0{,}0001$ *1/град;* для нихрома $\alpha=0{,}0002$ *1/град;* для константана $\alpha=0{,}00001$ *1/град;* для манганина $\alpha=0{,}00004$ *1/град*.

Это свойство проводников используется в термометрах сопротивления. Измеряя сопротивление, определяют расчетным путем окружающую температуру.

Пример 1. Как изменится сопротивление R_0 железной проволоки при нагреве ее на 520°? Для железа $\alpha=0{,}006$ *1/град*. По формуле (36)

$$R_1=R_0+R_0\alpha(t_1-t_0)=R_0+R_0\cdot 0{,}006\,(520-20)=4R_0,$$

то есть возрастет в 4 раза.

Пример 2. Алюминиевые провода при $t_1=-20°$ имеют сопротивление $R_1=5$ *ом*; определить их сопротивление R_2 при $t_2=30°$:

$$R_2=R_1-\alpha R_1(t_2-t_1)=5+0{,}004\cdot 5[30-(-20°)]=$$
$$=5+0{,}02\cdot 50=6\ \textit{ом}.$$

Свойство материалов изменять свое электрическое сопротивление при нагреве или охлаждении используется для измерения температур. Так, термосопротивления, представляющие собой проволоку из платины или чистого никеля, вплавленные в кварц, применяются для измерения температур от —200 до +600°. Полупроводниковые термосопротивления с большим от-

рицательным коэффициентом применяются для точного определения температур в более узких диапазонах.

Полупроводниковые термосопротивления, применяемые для измерения температур, мощности лучистой энергии и мощности электромагнитных колебаний при сверхвысоких частотах, называют термисторами.

Термисторы имеют высокий отрицательный температурный коэффициент сопротивления, то есть при нагреве их сопротивление уменьшается. Их выполняют из оксидных (подвергнутых окислению) полупроводниковых материалов, состоящих из смеси двух или трех окислов металлов. Наибольшее распространение имеют медно-марганцевые (ММТ) и кобальто-марганцевые (КМТ) термисторы. Последние более чувствительны к температуре.

Для измерений в сельскохозяйственной практике (в растениеводстве, в животноводстве, при сушке зерна и т. д.) применяют бусинковые термисторы, состоящие из двух тонких проволочек из иридиевой платины, соединенных шариком из полупроводниковых окислов никеля, магния и др. с добавкой тонкого медного порошка для увеличения проводимости. Термисторы включают в мостовые измерительные схемы.

§ 6. Реостаты и магазины сопротивлений

Реостат — это устройство, с помощью которого можно изменять сопротивление электрической цепи. Схема включения реостата показана на рисунке 9. Перемещая скользящий контакт *К* влево, можно уменьшать сопротивление реостата, а перемещая вправо, увеличивать его. Ток в цепи соответственно меняется.

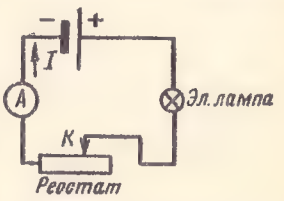


Рис. 9. Включение реостата для регулирования тока в цепи электрической лампы.

Сопротивление реостатов чаще изготавливают из проволоки (константана, нейзильбера, железа и т. д.). В непроволочных реостатах токопроводящим элементом служит тонкий слой проводящего материала, нанесенный на основание из изоляционного материала.

У ползунковых реостатов (тип РСП) витки проволоки уложены на керамической трубе плотно друг к другу,

но изолированно. Концы проволоки выведены на боковые зажимы, установленные на стойках реостата. Ползунковый контакт соединен через металлический стержень с третьим зажимом.

На рисунке 10 представлена схема реостата со ступенчатым переключением. Сопротивление этого реостата состоит из ряда секций, включенных между контактами K. Чтобы изменить величину сопротивления, включенного в цепь, перемещают переключатель $П$. Реостаты такого типа используются главным образом как пусковые для

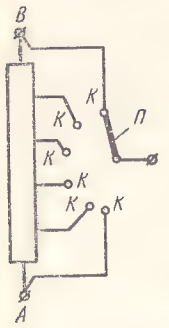


Рис. 10. Схема реостата со ступенчатым переключением.

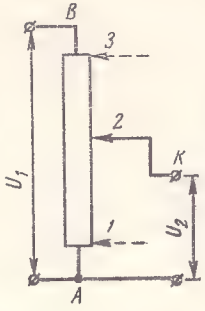


Рис. 11. Схема включения реостата как потенциометра.

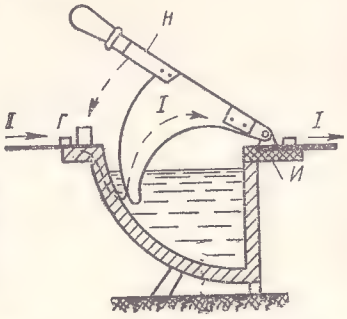


Рис. 12. Схема устройства жидкостного реостата:
Н — ножевой контакт; *Г* — контакт-губки; *I* — ток; *И* — изоляция.

электродвигателей постоянного тока и трехфазных асинхронных электродвигателей с фазным ротором.

Непроволочные реостаты (переменные сопротивления) широко используются в радиотехнике. Некоторые из таких сопротивлений выполняются вместе с выключателем на одной оси. При начальном повороте оси замыкаются контакты выключателя (включается, например, радиоприемник); при дальнейшем вращении оси регулируется сопротивление цепи (громкость приема).

На рисунке 11 представлена схема включения реостата в качестве потенциометра, то есть прибора, который позволяет взять от источника электрической энергии определенную часть напряжения.

К контактам A и B подведено напряжение U_1. С контактов A и K снимается напряжение U_2. Если ползунок, с которым соединен контакт K, находится в точке 1, то

напряжение U_2 равно нулю. При положении ползункового контакта в точке *3* напряжение U_2 равно U_1. Таким образом, меняя положение ползунка, можно получить любое напряжение от 0 до U_1.

На рисунке 12 представлена схема устройства ж и д к о с т н о г о р е о с т а т а, предназначенного для пуска больших трехфазных электродвигателей. В нем используется 10—15%-ный раствор соды или поташа. Чтобы раствор не замерзал, в него добавляют глицерин. Электродом служит пластинка из железа или латуни. Форма электрода выбрана таким образом, чтобы изменение сопротивления было пропорционально степени погружения электрода. При выведенном сопротивлении (электрод опущен полностью) нож *Н* входит в губки *Г* и ток не проходит через жидкость. В противном случае раствор быстро нагревается и закипает.

В цепях постоянного тока жидкостные реостаты не рекомендуется использовать в огнеопасных производственных помещениях, так как при постоянном токе происходит электролиз раствора и образуется взрывоопасный гремучий газ (смесь кислорода и водорода).

М а г а з и н ы с о п р о т и в л е н и й представляют собой наборы сопротивлений различных величин, позволяющие с помощью переключателей или штепселей выбрать нужную величину сопротивления в очень широких пределах. Например, магазин типа КМС-4 имеет 4 группы сопротивлений по 10 штук: от 0 до 9 *ом*, от 0 до 90 *ом*, от 0 до 900 *ом* и от 0 до 9000 *ом*. Таким образом, меняя положения четырех переключателей, можно установить величину сопротивления в пределах от 0 до 9999 *ом* с интервалом в 1 *ом*.

Элементы сопротивления в магазинах выполнены из манганиновой или константановой проволок, обладающих очень малыми температурными коэффициентами. В паспорте магазинов, кроме величин сопротивлений на ступенях, указан допускаемый ток через сопротивления. Превышать этот ток нельзя, так как сопротивления могут перегореть.

§ 7. Сопротивления постоянной величины

Сопротивления постоянной величины от нескольких омов до нескольких мегомов применяют в различных радиотехнических и телефонных устройствах, в некоторых

измерительных приборах и т. д. Эти сопротивления выбирают не только по величине, но и по мощности рассеивания, то есть номинальной мощности, развиваемой в них током. Чем больше мощность рассеивания, тем больше габариты сопротивления.

Сопротивления бывают проволочные и непроволочные. И те и другие могут быть регулируемые (переменные) и нерегулируемые (постоянные). Проволочные сопротивления типа ПЭ (проволочное эмалированное или остеклованное) изготавливают из константановой (низкоомные) или нихромовой (высокоомные) проволоки, которую наматывают на керамическую трубку, а снаружи покрывают предохранительным слоем стекловидной эмали. Величина этих сопротивлений бывает от 0,9 *ом* до 50 *ком*, а мощность рассеивания до 150 *вт*. ПЭВ — проволочное эмалированное влагостойкое сопротивление.

К непроволочным постоянным относятся сопротивления типов ВС — влагостойкие, УЛМ — углеродистые лакированные малогабаритные, МЛТ — металлизированные лакированные теплостойкие и т. д.

Сопротивления ВС изготавливают путем нанесения слоя углерода на керамическую основу — стержень, если мощность рассеивания 0,5—2 *вт*, или трубку, если мощность рассеивания 5—10 *вт*. У сопротивлений от 100 *ом* до 10 *Мом* слой углерода прорезают узкой спиральной канавкой. Чем выше сопротивление, тем тоньше слой, тем больше витков в спирали.

Сопротивления УЛМ аналогичны по устройству сопротивлениям ВС-0,25 (0,25 *вт*), но значительно меньше по размерам и обладают мощностью рассеивания 0,12 *вт*. Шкала значений от 27 *ом* до 1 *Мом*.

Величина сопротивлений МЛТ с мощностью рассеивания от 0,25 до 2 *вт* бывает от 100 *ом* до 10 *Мом*. На керамическую основу наносят металлизацией тонкий слой специального сплава и нарезают спираль.

Переменные сопротивления обозначают так: СП — сопротивление переменное, ВК — волюм-контроль, ТК — тон-контроль и т. д.

§ 8. Мощность в цепи постоянного тока, электрическая энергия и коэффициент полезного действия

В механике под мощностью понимают работу, произведенную в единицу времени (секунду). Единицей работы является джоуль (*дж*). Широко пользуются также старой единицей — килограммометром (*кГм*). Единицей мощности является соответственно джоуль в секунду (1 *дж/сек*=1 *вт*) или килограммометр в секунду (*кГм/сек*), а также лошадиная сила, равная 75 *кГм/сек*. Мощность P можно определить по следующей формуле:

$$P = \frac{GS}{t}\ кГм/сек = \frac{GS}{75t}\ л.\ с. = 9{,}81\,\frac{GS}{t}\ дж/сек =$$

$$= 9{,}81\,\frac{GS}{t}\ вт, \qquad (37)$$

где G — вес тела (*кг*);

S — путь, совершаемый телом при подъеме за t *сек* (*м*).

Пример 1. Расход воды через плотину на реке равен 10 $м^3$ в секунду, а высота между верхним и нижним уровнями равна 15 *м*. Определить, какую мощность может развивать электростанция на данной плотине.

Из формулы (37)

$$P = 9{,}81\,\frac{GS}{t}\ вт = 9{,}81\,\frac{10 \cdot 1000 \cdot 15}{1} = 1\,470\,000\ вт = 1470\ квт,$$

где принято, что 1 *л* воды весит 1 *кг*.

Электрическая мощность P определяется произведением напряжения на силу тока:

$$P = UI\ вт, \qquad (38)$$

где U — напряжение на токоприемнике (*в*);

I — сила тока через токоприемник (*а*).

Единица мощности 1 ватт=1 вольт·1 ампер. Принимая во внимание закон Ома $\left(U = IR;\ I = \frac{U}{R}\right)$, равенство (38) можно переписать следующим образом:

$$P = I^2R, \qquad (39)$$

$$P = \frac{U^2}{R}. \qquad (40)$$

В практике пользуются единицей мощности киловатт (*квт*), 1 *квт*=1000 *вт*.

Для обозначения мощности широко используются как *квт*, так и *л. с.* Между ними существуют следующие соотношения. Если $1\ л.с. = 75\ кГм/сек$, то $1\ квт = 102\ кГм/сек$. Отсюда

$$1\ л.с. = 0{,}736\ квт\ (\approx {}^{3}/_{4}\ квт);$$
$$1\ квт = 1{,}36\ л.с.\ (\approx 1{}^{1}/_{3}\ л.с.);$$
$$1\ кГм/сек = 0{,}0133\ л.с. = 9{,}81\ вт.$$

Пример 2. В паспорте двигателя указана мощность 25 *л. с.* Перевести эту мощность в *квт*.

$$1\ квт — 1{,}36\ л.с.;$$
$$x — 25\ л.с.$$
$$x = \frac{25}{1{,}36} = 18{,}4\ квт.$$

Пример 3. В паспорте двигателя указана мощность 28 *квт*. Перевести эту мощность в *л. с.*

$$1\ л.с. — 0{,}736\ квт;$$
$$x — 28\ квт$$
$$x = \frac{28}{0{,}736} = 28 \cdot 1{,}36 = 38\ л.с.$$

Как и в механике, электрическая энергия, или работа, равна произведению мощности на время:

$$W = Pt, \tag{41}$$

где W — энергия;
P — мощность;
t — время.

Единица энергии $1\ вт \cdot 1\ сек = 1\ вт \cdot сек = 1\ дж$. В практике пользуются значительно более крупной единицей — киловатт-часом ($квт \cdot ч$):

$$1\ квт \cdot ч = 1\ квт \cdot 1\ ч = 1000\ вт \cdot 3600\ сек =$$
$$= 3\,600\,000\ дж = 3\,600\,000\ вт \cdot сек = 1000\ вт \cdot ч.$$

Если взять значение P из уравнений (38), (39) и (40), то равенство (41) можно переписать так:

$$W = UIt = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt. \tag{42}$$

Пример 4. Нагревательный прибор, включенный в сеть 220 *в*, потребляет 5 *а*. Сколько энергии расходуется за сутки?

$$W = 220 \cdot 5 \cdot 24 = 26\,400\ вт \cdot ч = 26{,}4\ квт \cdot ч.$$

Пример 5. Нагревательный прибор потребил 10 $квт \cdot ч$ за 5 *ч*. Какова мощность прибора?

Из (41)

$$P = \frac{W}{t} = \frac{10}{5} = 2\ квт.$$

Тепловое действие тока. Прохождение электрического тока через проводник сопровождается выделением тепла. В нагревательных приборах получение тепла — это конечная цель. Но в ряде приборов (электродвигателях, осветительных приборах) выделение тепла представляет собой непроизводительные потери электрической энергии, которые снижают коэффициент полезного действия установки. При подсчете тепла, выделяемого в проводнике, устанавливается эквивалентное соотношение:

$$1\ дж = 1\ вт \cdot сек \approx 0{,}24\ кал,$$

где 1 *кал* (калория) — это такое количество тепла, которое нагревает 1 $см^3$ воды на 1°.

По закону Ленца—Джоуля, количество тепла Q, выделяемое током в проводнике, пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока:

$$Q = I^2Rt\ дж,$$

или

$$Q = 0{,}24 \cdot I^2Rt\ кал, \qquad (43)$$

где 0,24 — коэффициент пропорциональности или тепловой эквивалент джоуля;
I — сила тока (*а*);
R — сопротивление (*ом*);
t — время (*сек*).

Пример 6. Найти количество тепла, которое выделяется на сопротивлении $R = 20$ *ом* в течение $t = 1$ *ч* при протекании тока $I = 10$ *а*.

$$Q = 0{,}24 \cdot 100 \cdot 20 \cdot 3600 = 480 \cdot 3600 = 1\,728\,000\ кал = 1728\ ккал.$$

Пример 7. Определить, сколько потребуется электроэнергии, чтобы нагреть 10 *л* воды на 80°.

$$Q = 10\,000\ см^3 \cdot 80° = 800\,000\ кал.$$

$$W = \frac{Q}{0{,}24} = \frac{800\,000}{0{,}24} = 3\,340\,000\ вт \cdot сек = \frac{3\,340\ квт \cdot сек}{3600} = 0{,}93\ квт \cdot ч.$$

При всяком превращении одного вида энергии в другой наблюдаются потери энергии. Например, при превращении электрической энергии в механическую (в электрическом двигателе) часть электроэнергии, потребляемой

электродвигателем из сети, расходуется на нагрев двигателя, на трение в подшипниках и т. д. Если прибор потребляет из сети $P_{подв}$, а отдает $P_{пол}$, то коэффициент полезного действия (к.п.д.)

$$\eta = \frac{P_{пол}}{P_{подв}}. \qquad (44)$$

Пример 8. Водонагревательный прибор потребляет из сети мощность, равную 1 *квт*. 50 *л* воды нагреваются на 80° в течение 5 *ч*. Каков к. п. д. водонагревателя?

Потребляемая из сети за 5 *ч* электроэнергия

$$W = Pt = 1\ квт \cdot 5\ ч = 5\ квт \cdot ч = 5000 \cdot 3600\ дж,$$

это эквивалентно количеству тепла Q, равному

$$Q_{подв} = 0{,}24 \cdot W = 0{,}24 \cdot 5000 \cdot 3600\ кал.$$

Для нагрева 50 *л* воды на 80° используется

$$Q_{пол} = cV(t_2 - t_1) = 50\,000 \cdot 80\ кал.$$

Часть тепла, равная разности $Q_{подв} - Q_{пол}$, теряется при охлаждении нагревателя. Тогда к. п. д.

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{Q_{подв}} = \frac{50\,000 \cdot 80}{5000 \cdot 3600 \cdot 0{,}24} = \frac{800}{36 \cdot 24} = 0{,}925, \text{ или } 92{,}5\%,$$

где $Q_{пол}$ — тепло, ушедшее на нагрев воды;
$Q_{подв}$ — тепло, выделившееся в нагревателях за счет потребленной из сети электрической энергии.

Глава III

Источники постоянного тока

§ 1. Гальванические элементы

Гальванические элементы являются первичными химическими источниками тока. В них создается электрическая энергия в результате химической реакции веществ электродов. Реакция происходит только тогда, когда во внешней цепи протекает ток. Химические реакции в гальванических элементах необратимы. В простейшем виде элемент состоит из двух электродов, выполненных из разных металлов и погруженных в раствор электролита. Один из металлических электродов может быть заменен угольным или электродом, содержащим окислы металлов. При погружении в электролит каждый из электродов заряжается до определенного

значения электростатического потенциала, который возникает на границе двух сред между электродом и электролитом.

Вследствие неодинаковой природы обоих электродов они приобретают различные потенциалы. Разница потенциалов или электродвижущая сила для различных элементов находится в пределах от 0,85 до 2,1 *в*. Если замкнуть оба электрода на внешнюю электрическую цепь, в ней возникнет ток. При этом на поверхности электродов

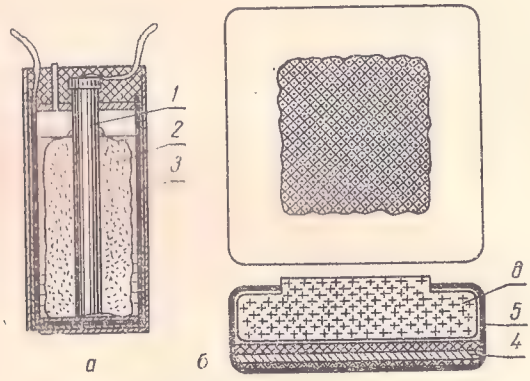


Рис. 13. Гальванический элемент:

а — в виде стаканчика; *б* — в виде галеты; *1* — угольный стержень; *2* — масса из активированного угля или смеси двуокиси марганца с графитом; *3* и *4* — цинковая обкладка (электрод); *5*— хлорвиниловая пленка; *6* — электрод из угольной массы.

будут происходить электрохимические реакции, способствующие поддержанию разницы потенциалов.

В наиболее широко применяемых гальванических элементах (для питания радиоприемников, карманных фонарей и т. д.) положительный электрод представляет собой угольный стержень *1* (рис. 13) и массу *2* из активированного угля или смеси двуокиси марганца с графитом, а отрицательный — цинковую обкладку *3* в виде стаканчика или чашечки. В качестве электролита чаще всего используется раствор нашатыря. Сухие гальванические элементы поступают потребителю в готовом виде; водоналивные перед употреблением необходимо залить чистой водой.

Чтобы получить необходимое напряжение для работы какого-либо прибора, элементы соединяют в б а т а р е ю, включая их последовательно, то есть положительный полюс каждого предыдущего элемента соединяют с отрицательным полюсом последующего (рис. 14, *а*). Общая

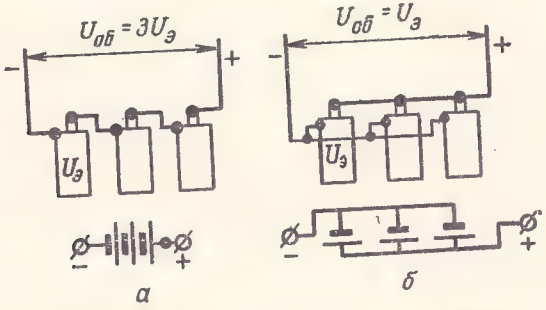


Рис. 14. Соединение элементов в батарею:
а — последовательное; *б* — параллельное.

электродвижущая сила батарей в этом случае равна сумме электродвижущих сил отдельных элементов:

$$E_{об} = E_1 + E_2 + E_3 + \ldots + E_n. \qquad (45)$$

Если элементы одинаковые и их э. д. с. равны, то э. д. с. батареи $E_{об}$, состоящей из n элементов,

$$E_{об} = nE_{эл}. \qquad (46)$$

Если требуется небольшое напряжение, а ток нагрузки — превышающий ток разрядки одного элемента, используют батарею из параллельно включенных элементов (рис. 14,*б*), в которой все полюсы одинаковых полярностей соединены между собой. В этом случае э. д. с. всей батареи равна э. д. с. одного из элементов, а емкость увеличивается в n раз, где n — число элементов в батарее.

В г а л е т н ы х б а т а р е я х элемент имеет плоскую форму и удобен для соединения в батарею. Устройство галеты показано на рисунке 13, *б*. На наружную сторону цинкового электрода *4* нанесен специальный электропроводный слой, не пропускающий электролит. Собранный элемент покрывают тонкой хлорвиниловой пленкой *5*. Пленочное покрытие изолирует отдельные элементы с боков, препятствует вытеканию электролита,

но легко пропускает газы, образующиеся внутри элемента. Масса из активированного угля *б* несколько выступает из галеты для удобного контакта с другой галетой. В этих батареях активный материал используется лучше и полнее, чем у стаканчиковых батарей.

Цифры в маркировке батарей означают следующее: первые — начальное напряжение свежей батареи в вольтах, последние — начальную емкость батареи в ампер-часах или продолжительность ее работы в часах, если за последней цифрой стоит буква «ч». Первые буквы означают: А — анодная, Н — накальная, Ф — фонарная, Т — телефонная, П — приборная, АН — анодно-накальная, АС — анодно-сеточная, СА — слуховой анод, ЭВ — для электронной вспышки и т. д. Буквы МЦ — батарея угольномарганцево-цинковая, далее — Г — галетная, Ч — чашечковая. Отсутствие буквы после МЦ указывает на то, что батарея стаканчиковая. Буквы Х и У означают соответственно хладостойкая и универсальная (в зависимости от состава электролита). Летние батареи отличительной буквы не имеют. Пример: 102-АМЦ-У-1 означает батарея анодная, 102 *в*, универсальная, емкость 1 ампер-час. Энергия, получаемая от гальванических элементов, значительно дороже энергии, полученной из сети.

Гальванические элементы необходимо защищать от коротких замыканий и не рекомендуется проверять «на искру». Напряжение их следует измерять под нагрузкой. При отсутствии нагрузки вольтметр покажет э. д. с., которая не характеризует степени использования батареи.

Для питания приборов на полупроводниковых триодах (транзисторах) применяются окисно-ртутные (ОР) гальванические элементы миниатюрных размеров — диаметром до 30 *мм* и высотой до 14 *мм*.

§ 2. Аккумуляторы — вторичные химические элементы

Аккумуляторы обладают способностью накапливать (аккумулировать) химическую энергию под действием электрического тока и затем, по мере надобности, отдавать ее в виде электрической энергии во внешнюю цепь.

При правильной эксплуатации аккумуляторы выдерживают до 500 и более циклов заряд—разряд. В буферном режиме, когда аккумулятор включен параллельно

с генератором постоянного тока и служит главным образом для сглаживания колебаний напряжения последнего, срок службы исчисляется годами. Стоимость энергии от аккумуляторов в 4—5 раз больше, чем от сети.

В настоящее время широкое применение нашли аккумуляторы кислотные (свинцовые), щелочные (кадмиево-никелевые и железо-никелевые), серебряно-цинковые (СЦ). В серебряно-цинковых аккумуляторах в качестве активных материалов применяются серебро и окись цинка, а сепараторы выполняются из ионообменных смол. Электролитом служит раствор едкого калия. Эти батареи в 6 раз легче и в 5 раз меньше по размерам, чем свинцово-кислотные той же емкости. Они нашли широкое применение в ответственных электроустановках.

В свинцовых аккумуляторах в качестве активного вещества на положительном электроде используется двуокись свинца PbO_2, на отрицательном электроде — губчатый металлический свинец Pb. Электролитом служит раствор серной кислоты H_2SO_4 с удельным весом 1,18—1,29. При разряде свинцового аккумулятора происходит химический процесс:

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O. \qquad (47)$$

При заряде процесс идет в обратном направлении.

В кадмиево-никелевых аккумуляторах активными веществами положительного электрода являются окислы никеля, смешанные для увеличения электропроводности с графитом, а отрицательного электрода — губчатый металлический кадмий в смеси с губчатым железом. Электролитом служит раствор едкого кали или едкого натра иногда с добавлением едкого лития. В железо-никелевых аккумуляторах вместо кадмия используется мелкий порошок железа, поэтому их стоимость значительно ниже. Недостаток железо-никелевых аккумуляторов — большой саморазряд.

В обозначении аккумуляторов первое число указывает количество аккумуляторных банок в батарее, последнее число — емкость батареи в ампер-часах. Буквы в маркировке кислотных аккумуляторов означают: С— стационарный, СК — стационарный для кратковременных разрядов, СТ — стартерный для автомобилей и дру-

гих машин, МТ — мотоциклетный, А — авиационный, РА — радиоанодный, РН — радионакальный и т. д.

В щелочных аккумуляторах буквы в маркировке означают: КН — кадмиево-никелевый, ЖН — железо-никелевый, ТЖН — тяжелый железо-никелевый и т. д.

Основной характеристикой аккумуляторов является их емкость в ампер-часах. Она вычисляется как произведение силы тока при разряде на продолжительность включения аккумулятора в часах. Так, если емкость равна 100 *а·ч*, то при силе тока в 10 *а* обеспечивается работа токоприемника в течение 10 *ч*, при силе тока 5 *а* — в течение 20 *ч* и т. д. Емкость зависит от конструкции аккумулятора, от качества его заряда, а также от величины разрядного тока.

§ 3. Эксплуатация аккумуляторов

Кислотные аккумуляторы типа С и СК выпускают на емкость от 36 до 5328 ампер-часов при 10-часовом разряде. Элементы СК отличаются от элементов С утолщенными межэлементными соединительными полосами. Тип С предназначен для разряда от 3 до 10 *ч*, а тип СК — от 1 до 10 *ч*. Аккумуляторы выпускают 45 размеров. Основные данные аккумуляторов 1 размера приведены в таблице 5.

Таблица 5

Некоторые данные аккумуляторов 1 размера

Тип аккумулятора	Продолжительность разряда (*ч*)	Сила разрядного тока (*а*)	Емкость (*а·ч*)	Конечное напряжение разряда (*в*)
СК-1	1	18,5	18,5	1,75
	2	11	22	1,75
СК-1 и С-1	3	9	27	1,8
	5	6	30	1,8
	7,5	4,4	33	1,8
	10	3,6	36	1,8

Рекомендуемая максимально допустимая сила зарядного тока для аккумуляторов типа СК-1 равна 11 *а*, для типа С-1—9 *а*. Чтобы определить емкость, зарядный

и разрядный токи аккумуляторов этих же типов, но других размеров, необходимо соответствующие данные для 1 размера умножить на номер размера определяемого аккумулятора.

Переносные аккумуляторы типа СТ (стартерные) изготавливают на 6 и 12 *в* с номинальной емкостью до 144 *а·ч*. В обозначении стартерного аккумулятора, например 3СТЭ-112 или 3СТП-100, буквы Э и П означают соответственно эбонитовый или пластмассовый бак.

Электролит кислотных аккумуляторов составляют из химически чистой серной кислоты и дистиллированной воды. Плотность электролита или его удельный вес для различных аккумуляторов принимают различными, в зависимости от условий, в которых работают аккумуляторы. Чем выше плотность электролита, тем ниже температура замерзания, но и тем меньше срок службы аккумулятора.

Плотность электролита измеряют а р е о м е т р о м. Нормальная плотность должна быть в пределах 1,15—1,23 *г/см*³. При плотности электролита 1,15 *г/см*³ требуется 239 *г* серной кислоты с плотностью 1,8 *г/см*³ на 1 *л* электролита; при плотности электролита 1,23 *г/см*³ требуется 382 *г* кислоты на 1 *л* электролита. Вместо дистиллированной воды можно использовать дождевую или снеговую воду.

При составлении электролита в стеклянную посуду наливают сначала дистиллированную воду, а затем тонкой струйкой серную кислоту. *Категорически запрещается лить воду в серную кислоту*, так как капли воды, соприкасаясь с серной кислотой, сильно нагреваются и испаряются. При этом они уносят с собой капельки серной кислоты, которые могут причинить ожоги. В случае попадания кислоты на тело необходимо немедленно промыть это место раствором соды, а затем холодной водой.

Нормальная температура кислотного электролита 25°. Повышение температуры свыше 40° недопустимо. Уровень электролита в аккумуляторе должен быть выше верхнего края пластин примерно на 10 *мм* (проверяют стеклянной палочкой или трубкой). Доливать электролит в аккумулятор рекомендуется перед зарядкой. Во время зарядки пробки аккумулятора открывают. Величина зарядного тока указана в паспорте аккумулятора.

Аккумуляторы нельзя разряжать ниже конечного напряжения разрядки. Как только аккумуляторная батарея

разрядилась до предельно допустимого напряжения, ее необходимо заново зарядить. При зарядке повышают напряжение на зарядном агрегате до величины несколько большей, чем напряжение на батарее (2,1—2,15 *в* на банку), затем подключают к нему батарею. Аккумулятор можно заряжать несколькими способами: при неизменном зарядном токе, при неизменном зарядном напряжении, при предельно допустимых зарядных токах, соответствующих каждой стадии заряда.

Предельно допустимые токи устанавливают опытным путем. Их выбирают таким образом, чтобы процесс зарядки протекал без бурного выделения газов на пластинах аккумуляторов. Последний способ зарядки наиболее рациональный. В СССР принят метод зарядки свинцово-кислотных аккумуляторов в две ступени. Максимально допустимые токи зарядки для аккумуляторов типа С и СК были указаны выше: для типа С ток равен 9N *а*, где N — номер размера элемента; для типа СК он равен 11N *а*. Ток может быть также определен из емкости аккумулятора как ток 4-часовой зарядки для типа С и как ток 3,27-часовой зарядки для типа СК. Однако в практике ток первой ступени зарядки не обязательно должен иметь предельно допустимую величину. Его обычно выбирают в пределах

$$I_{1\,зар} = (3{,}6N \div 11N)\ а. \tag{48}$$

Ток второй ступени

$$I_{2\,зар} = 2{,}25N\ а. \tag{49}$$

Током первой ступени зарядку ведут в течение времени t_1, пока не начнется выделение газа из пластин. После этого зарядный ток снижают до величины $I_{2зар}$ и продолжают зарядку еще t_2 часов (обычно 2—3 часа). При этом общий заряд, сообщаемый аккумулятору,

$$I_{1\,зар}\,t_1 + I_{2\,зар}\,t_2 = \frac{Q_{раз}}{\eta_э} = Q_{зар}, \tag{50}$$

где $Q_{раз}$ — заряд, отданный аккумулятором при разрядке;

$\eta_э = \frac{Q_{раз}}{Q_{зар}}$ — коэффициент отдачи аккумулятора;

$Q_{зар}$ — заряд, полученный аккумулятором при зарядке.

Таким образом, при зарядке наблюдаются два характерных периода. В первом периоде напряжение на аккумуляторе поднимается медленно и держится длительное время в пределах 2,2—2,36 *в*. Во втором периоде, после того как на пластинах аккумулятора начинают бурно выделяться газы и появляется необходимость снизить зарядный ток, напряжение быстро увеличивается и достигает своего предельного значения 2,5—2,7 *в*. После окончания зарядки выравнивается концентрация раствора в пластинах и э. д. с. снижается до значения, соответствующего установившейся концентрации электролита в аккумуляторе.

Нельзя оставлять аккумулятор незаряженным, так как в этом случае его пластины покрываются кристаллами сульфата и емкость аккумулятора снижается. На период хранения аккумулятор разряжают, сливают электролит и водой смывают с пластин следы кислоты. После промывки пробки плотно завертывают.

Аккумулятор можно хранить и в заряженном состоянии. Но в этом случае его следует не реже одного раза в месяц заряжать, ибо в результате саморазряда он может полностью разрядиться, и пластины покроются сульфатом.

Надо помнить, что при зарядке аккумуляторов в результате электролиза воды в электролите помещение наполняется гремучим газом, то есть смесью водорода и кислорода, которая может взорваться от случайной искры. Поэтому в аккумуляторных помещениях категорически запрещается курить и пользоваться рубильниками и выключателями, которые могут вызвать искру.

Новые аккумуляторы подвергают двум-трем режимам зарядки и разрядки. Зарядный ток при этом берут в 2 раза меньше, чем обычный периодический зарядный ток. Разрядку ведут током 10-часовой разрядки.

При периодических осмотрах исправный аккумулятор отвечает следующим требованиям: а) подтекающих элементов нет; б) уровень электролита нормальный; в) сульфатации (белого налета на пластинах) нет; г) пластины не коробятся; д) коротких замыканий пластин нет; е) коррозии пластин не наблюдается; ж) высота осадков в банке нормальная; з) плотность электролита и напряжение каждого элемента нормальные.

Сроки проверки следующие: сульфатацию проверяют не реже одного раза в 2—3 месяца, высоту электролита—

раз в 3—6 месяцев, химический анализ электролита проводят раз в 6 месяцев.

Щелочные аккумуляторы. Электролит составляют из дистиллированной воды и едкого кали или натра. При температуре эксплуатации от —15 до +40° рекомендуется электролит, состоящий из КОН+LiOH плотностью 1,19—1,21 *г/см*³, при температуре эксплуатации от +15 до +35° — электролит из NaOH плотностью 1,17—1,19 *г/см*³, при температуре от +40 до +60° — электролит из NaOH+LiOH плотностью 1,17—1,19 *г/см*³. При плотности 1,17 *г/см*³ в 1 *л* электролита содержится 176,2 *г* едкого натра, а при плотности 1,19 содержится 201,2 г едкого натра. Электролиты можно приготавливать только в стеклянной или керамической посуде. Аккумулятор заливают только остывшим электролитом с температурой не более +25°. По мере расхода электролита его доливают дистиллированной водой или слабым раствором едкого кали. Рекомендуется периодически очищать аккумулятор от пыли и грязи, а неокрашенные металлические наружные части смазывать техническим вазелином. Если на тело или одежду попала едкая щелочь, ее надо смыть 2%-ным раствором борной кислоты, а затем промыть загрязненное место чистой водой.

Зарядный ток аккумулятора указан в паспорте, его можно также определить по формуле

$$I_{зар} = \frac{Q}{4}, \qquad (51)$$

где Q — емкость аккумулятора.

Продолжительность нормальной зарядки — не менее 6 *ч*. Но при форсированной зарядке время можно сократить до 4 *ч*: 2,5 *ч* заряжать двойным нормальным током и 1,5 *ч* — нормальным током. К концу зарядки напряжение на клеммах банки достигает 1,8 *в*. При достижении этого напряжения аккумулятор следует подержать под зарядкой еще полчаса, а затем прекратить ее.

При зарядке щелочных аккумуляторов выделяются кислород и водород. Поэтому пробки должны быть вывернуты. Завинчивать их следует не раньше чем через 6 *ч* после окончания зарядки.

Разрядку щелочного аккумулятора следует заканчивать при снижении напряжения на его клеммах до 1,1 *в* и в крайнем случае — до 0,8 *в*.

На рисунке 15 приведена простейшая схема включения аккумуляторов на зарядку. К источнику зарядного тока *ИЗТ* (генератору постоянного тока или выпрямителю) аккумулятор *Ак* подключен через регулировочный реостат *R*. Зарядный ток контролируют по амперметру, напряжение на аккумуляторе — по вольтметру.

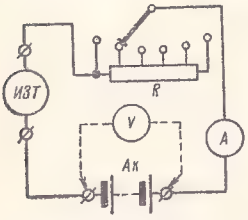


Рис. 15. Простейшая схема включения аккумулятора на зарядку:

ИЗТ — источник зарядного тока; *Ак* — аккумулятор.

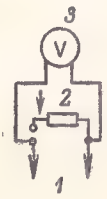


Рис. 16. Схема устройства нагрузочной вилки:

1 — контакты с острыми концами; *2* — нагрузочное сопротивление; *3* — вольтметр.

Для проверки степени зарядки аккумуляторов под нагрузкой применяют нагрузочную вилку (рис. 16). Она состоит из стержневых контактов *1* с острыми концами, которые создают надежный контакт вилки с зажимами аккумуляторного элемента. При измерениях электроды соединяются между собой нагрузочным сопротивлением *2*, величина которого равна 0,012 *ом*. Вольтметр *3* включен параллельно нагрузочному сопротивлению. Нагрузочной вилкой поочередно проверяют элементы аккумулятора. Через нагрузочное сопротивление протекает ток порядка 100 *а*. При 100%-ной зарядке напряжение элемента кислотного аккумулятора под нагрузкой равно 1,7—1,8 *в*; при 75%-ной зарядке — 1,6—1,7 *в*; при 50%-ной зарядке — 1,5—1,6 *в* и 25%-ной зарядке — 1,4—1,5 *в*.

§ 4. Топливные элементы

В последние годы ученые многих стран усиленно работают над усовершенствованием новых типов химических источников электрической энергии, работающих за счет химических реакций окисления кислородом (горения) газообразного или жидкого топлива.

Принцип действия этих элементов заключается в следующем. Положительный и отрицательный электроды выполняют пористыми, например из массы, полученной спеканием угля, никеля, серебра. Между электродами находится электролит (едкий кали и др.). С обратной от элек-

тролита стороны к одному электроду подводят кислород, а к другому — водород, пропан или другой горючий газ.

Газы подводят под таким давлением, чтобы они соприкасались с электролитом в порах внутри электродов. В зоне соприкосновения газа и электролита происходит химическая реакция соединения (горения) газов. Между двумя электродами возникает разность потенциалов, и во внешней цепи, включенной на электроды, протекает ток до тех пор, пока в электроды подаются сгорающие в элементе газы. В жидкостных топливных элементах топливо растворено в электролите. В элементе, в котором сгорает водород и кислород, образуется вода, то есть происходит процесс, обратный электролизу воды в водород и кислород под действием напряжения, приложенного к погруженным в воду электродам.

Созданы топливные элементы, могущие отдавать мощность более чем 300 *квт* с 1 $м^3$ элемента. Коэффициент полезного действия элементов приближается к 75—80%, что значительно выше к. п. д. самых совершенных двигателей внутреннего сгорания. Срок службы их очень большой, так как электроды практически не изнашиваются.

§ 5. Термоэлектрогенераторы

Действие термоэлектрогенератора основано на использовании термоэлектрического эффекта, сущность которого заключается в том, что при нагревании места соединения (спая) двух разных металлов между их свободными концами, имеющими более низкую температуру, возникает разность потенциалов, так называемая термоэлектродвижущая сила. Если замкнуть такой термоэлемент (термопару) на внешнее сопротивление, то по цепи потечет электрический ток (рис. 17). Происходит прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

Величину термоэлектродвижущей силы приближенно определяют по формуле

$$E = \alpha (T_1 - T_2) \cdot 10^{-3}\ в, \qquad (52)$$

где T_1 и T_2 — соответственно температуры нагретого и холодного спаев (концов) термопары;

α — коэффициент термо-э. д. с., зависящий от природы обоих металлов *1* и *2* и выражающийся в милливольтах на градус. Для пары висмут-сурьма α достигает 11,2 *мв/град*, для пары железо-константан — 5 *мв/град*, для пары железо-алюминий — 1,22 *мв/град* и т. д.

Если температуру холодного спая поддерживать постоянной, термо-э. д. с. будет изменяться пропорционально изменению температуры горячего спая. Это дает возможность применять термопары для измерения температуры. Коэффициент полезного действия таких термопар менее 0,1%.

В настоящее время разработаны термопары со зна-

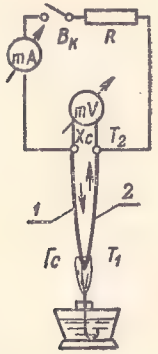


Рис. 17. Получение термоэлектричества:
Гс — горячий спай; *Хс* — холодный спай; *1* и *2* — отрицательный и положительный термоэлектроды.

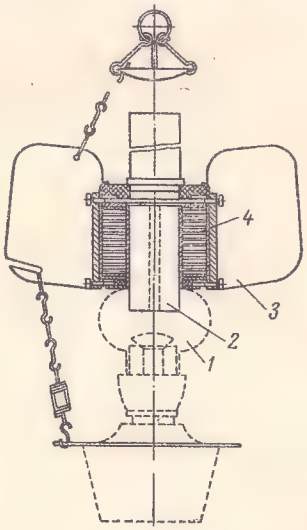


Рис. 18. Термоэлектрогенератор для питания радиоаппаратуры:
1 — стекло; *2* — металлический теплопередатчик; *3* — охлаждающие металлические ребра; *4* — блоки термобатарей.

чительно бо́льшим коэффициентом полезного действия. На их основе созданы термоэлектрогенераторы (ТГК, ТЭГК и др.), пригодные для питания радиотехнических устройств.

На рисунке 18 представлен термоэлектрогенератор для питания радиоприемников, используемый в неэлектрифицированных отделениях хозяйств, в экспедициях, в поле-

вых условиях. В качестве источника тепловой энергии используется керосиновая лампа типа «Молния». Стекло *1* укорочено, внутрь него входит нижняя часть металлического теплопередатчика *2*. На боковой поверхности теплопередатчика расположены блоки термобатарей *4*. Для охлаждения холодных спаев термоэлементов к внешним поверхностям блоков прикреплены металлические радиаторные ребра *3*, предназначенные для воздушного охлаждения.

Термоэлектрогенератор имеет две самостоятельные термобатареи, состоящие из большого числа последовательно соединенных элементов. Одна из них дает напряжение 2 *в* для накала ламп приемника, вторая — напряжение 80 *в* для питания цепей анода. В некоторых типах термоэлектрогенераторов вторая термобатарея также дает 2 *в*, а для получения анодного напряжения используется вибропреобразователь, преобразующий 2 *в* в напряжение 80 *в*. Спаи термоэлементов электрически изолированы от нагревателя и от ребер.

Основным преимуществом термоэлектрогенератора по сравнению с сухими элементами и батареями является уменьшение расхода цветных металлов. Кроме того, он может неограниченно долго храниться в нерабочем состоянии, а в условиях эксплуатации срок его службы превышает 4000 *ч*. Он устойчив в работе, дает стабильное напряжение, не боится коротких замыканий, не требует специального ухода. При разности температур между спаями порядка 300° каждый термоэлемент развивает э. д. с. около 55 *мв*. Коэффициент полезного действия преобразователя тепловой энергии в электрическую составляет 3,5% и выше. В настоящее время получен коэффициент полезного действия полупроводниковых термопар 14%, что значительно выше коэффициента полезного действия паровой машины. Удельная мощность современных термоэлектрогенераторов находится в пределах от 4 до 22 *вт* на 1 *кг* установки. Но в ближайшие годы она возрастет до 220 *вт/кг* и более.

В термопарах используют цинк, сурьму, теллур, уголь и др., а также сплавы различных металлов. В настоящее время выпускают термоэлектрогенераторы для питания приемников «Родина», «Искра», «Таллин» и др. (ТГК-3, ТГК-2-2), радиостанций «Урожай», малых колхозных радиоузлов (ТГК-10 мощностью 10—12 *вт*). Разработаны

и осваиваются производством термобатареи, мощностью 16, 18, 36 *вт* с подогревом их от газовых горелок (ТГГ-16) от керогазовых горелок (ТГК-18, ТГК-36) и т. д.

В недалеком будущем широкое применение найдут термоэлектроустановки малой и средней мощности, к. п. д. которых будет близок по величине к к. п. д. крупных современных электростанций.

§ 6. Фотоэлементы и «солнечные батареи»

Фотоэлементом называется устройство, в котором с помощью полупроводников световая энергия преобразуется в электрическую.

Первые полупроводниковые фотоэлементы были разработаны и получили практическое применение около четверти века тому назад. В качестве полупроводника в них использовалась закись меди, а затем селен, давший лучшие результаты. Селеновые фотоэлементы промышленность выпускает и в настоящее время. В частности, селеновый фотоэлемент используют в люксметрах — приборах для измерения освещенности. Селеновый фотоэлемент является неотъемлемой частью фотографического экспонометра, который измеряет освещенность фотографируемого объекта. Фотоэлемент экспонометра включен последовательно со стрелочным гальванометром.

Коэффициент полезного действия селеновых фотоэлементов не превышает 0,1%, и их используют лишь для измерительных целей.

Германиевые фотоэлементы обладают к. п. д. около 5%, кремниевые — от 7 до 11% и выше. Из кремниевых фотоэлементов составляют «солнечные батареи», которые служат для прямого преобразования излучаемой солнцем энергии в электрическую.

На рисунке 19 представлены схемы устройства кремниевого фотоэлемента. В конструкции (рис. 19,*а*) очень тонкая пластинка кремния покрыта очень тонким (прозрачным) слоем золота. Под действием светового потока в элементе происходит интенсивное движение электронов от поверхности внутрь кремния. В замкнутой цепи течет ток. Электродвижущая сила такого элемента составляет около 0,5 *в*.

Если произошло короткое замыкание выводных проводов элемента, то при прямом солнечном освещении и

площади освещаемой поверхности 1 *см*² ток короткого замыкания достигает 0,025 *а*. Мощность, снимаемая с 1 *см*², составляет 0,006 *вт*.

Чтобы увеличить напряжение, элементы соединяют в батарею последовательно. Если нужно увеличить ток, элементы соединяют параллельно. Для кремниевого фотоэлемента при отсутствии потерь теоретический к. п. д.

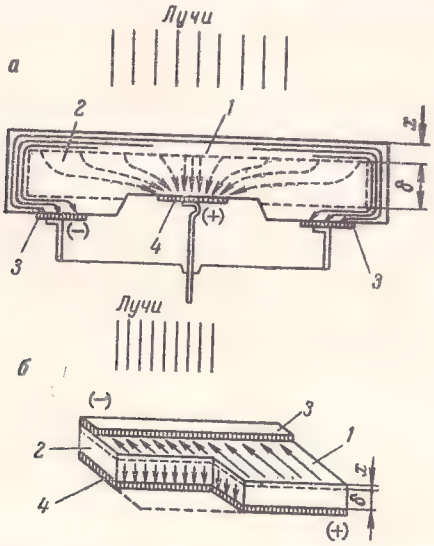


Рис. 19. Схема устройства кремниевого фотоэлемента:

а — первоначальная конструкция фотоэлемента; *б* — современная конструкция элемента солнечной батареи, удобная для складывания в батарею; *1* — слой кремния, в котором появляется избыток электронов при воздействии на него световыми лучами (*n*-слой); *2* — слой кремния, в котором возникает недостаток электронов при воздействии на него световыми лучами (*p* - слой); *3* — токоотвод от *n*-слоя; *4* — токоотвод от *p*-слоя; стрелками показано движение носителей тока (зарядов) в слое *n* и в слое *p*.

составляет 22%. Из-за различных потерь (отражения солнечных лучей от поверхности фотоэлемента, наличия сопротивления в самом элементе и контактных выводах) к. п. д. значительно снижается. Подсчитано, что с каждого квадратного метра поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, на уровне верхних слоев атмосферы можно получать мощность, равную 1350 *вт*. Энергия, даваемая «солнечной батареей» площадью 70 *м*², смонтированной на крыше небольшого дома, могла бы обеспечить населе-

ние этого дома электрической энергией для освещения и отопления. Эта батарея должна работать совместно с аккумуляторной батареей, которая днем будет подзаряжаться, а вечером отдавать энергию для питания электроприборов.

В связи со сложным процессом получения чистого кремния «солнечные батареи» пока довольно дороги, но они уже применяются для питания радиотехнических устройств. В частности, «солнечные батареи» применены на искусственных спутниках земли и космических кораблях для питания радиоаппаратуры и других устройств. С совершенствованием технологии получения чистого кремния солнечные элементы получат широкое применение в повседневной жизни.

В атомных батареях на пластинку кремния или германия нанесен слой радиоактивного материала, излучение которого заменяет свет в фотоэлементах. В зависимости от скорости распада (периода полураспада) радиоактивного материала батарея может работать без замены до нескольких десятков лет. Ввиду высокой стоимости батареи и чрезвычайной вредности радиоактивных излучений атомные батареи не имеют перспектив широкого практического применения.

Глава IV

Электромагнетизм

§ 1. Естественный магнит и магнитное поле

Магнитом называют стальной предмет, который притягивает и прочно удерживает другие стальные предметы. Магнитными свойствами обладают некоторые железные руды (магнитный железняк).

Молекулы железа представляют собой элементарные магнитные частицы, что является следствием молекулярных электрических токов. В немагнитном железном стержне эти молекулы расположены в беспорядке (рис. 20,*а*). Под действием естественного магнитного поля молекулы располагаются в определенном порядке (рис. 20,*б*). Железный стержень приобретает магнитные свойства. Концы

стержня, которые обладают максимальной силой, называют полюсами — северным и южным, по аналогии с магнитными полюсами Земли, которая сама представляет собой огромный магнит.

Естественные магниты выполняют стержневыми и подковообразными. К подковообразному магниту прилагают якорь — стальной брусок, который замыкает магнитные силовые линии.

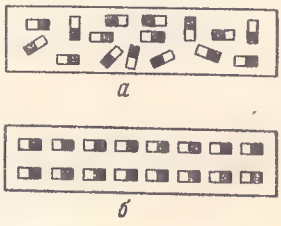


Рис. 20. Расположение молекул в стержне:
а — стержень немагнитный;
б — стержень намагниченный.

Пространство вокруг полюсов магнита, в котором проявляются магнитные свойства, называется магнитным полем. Опыт показывает, что одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются. Притягивающая сила полюсов магнита быстро падает по мере удаления от них.

Здесь также действует закон Кулона: *сила, с которой два одноименных полюса отталкиваются и два разноименных притягиваются, равна произведению их магнитных сил, деленному на квадрат расстояния между ними.*

Если на два разноименных полюса магнита наложить бумагу и насыпать сверху железные опилки, то они рас-

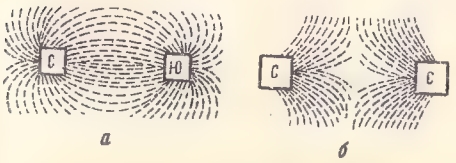


Рис. 21. Магнитные силовые линии между двумя разноименными (*а*) и одноименными (*б*) полюсами магнита.

Рис. 22. Направление магнитных силовых линий.

положатся в определенном порядке, замыкаясь непрерывными линиями от полюса к полюсу (рис. 21,*а*). Магнитные силовые линии от двух одноименных полюсов (рис. 21,*б*) отталкиваются, не замыкаясь. Плотность магнитных силовых линий у полюсов выше, чем на некотором расстоянии от них.

Принято считать, что силовые линии окружающего магнитного поля направлены от северного полюса к южному (рис. 22). Внутри стержня магнитные линии замыкаются от южного полюса к северному.

§ 2. Магнитное поле проводника с током

Электрический ток в проводнике образует магнитное поле вокруг проводника. Электрический ток и магнитное поле — это две неотделимые друг от друга стороны единого физического процесса. Магнитное поле постоянных магнитов в конечном счете также порождается молекулярными электрическими токами, образованными движением электронов по орбитам и вращением их вокруг своих осей.

Магнитное поле проводника и направление его силовых линий можно определить с помощью магнитной стрелки. Магнитные линии прямолинейного проводника имеют форму концентрических окружностей, расположенных

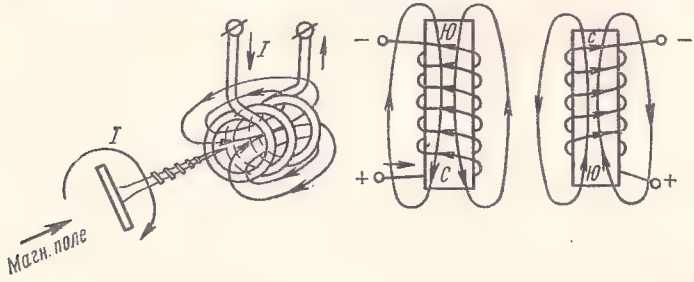


Рис. 23. Магнитное поле катушки.

в плоскости, перпендикулярной проводнику. Направление магнитных силовых линий зависит от направления тока в проводнике. Если ток в проводнике идет от наблюдателя, то силовые линии направлены по часовой стрелке. Зависимость направления поля от направления тока определяется правилом буравчика: *при совпадении поступательного движения буравчика с направлением тока в проводнике направление вращения ручки совпадает с направлением магнитных линий.*

Правилом буравчика можно пользоваться и для определения направления магнитного поля в катушке, но в следующей формулировке: *если направление вращения*

рукоятки буравчика совместить с направлением тока в витках катушки, то поступательное движение буравчика покажет направление силовых линий поля внутри катушки (рис. 23). Внутри катушки эти линии идут от южного полюса к северному, а вне—от северного к южному.

Правилом буравчика можно пользоваться также и при определении направления тока, если известно направление силовых линий магнитного поля.

§ 3. Напряженность магнитного поля и магнитная индукция

Сила, с которой магнитное поле притягивает железные предметы, пропорциональна величине протекающего по проводнику тока. Если провод уложен в виде катушки, то эта сила тем больше, чем больше витков имеет катушка. Произведение величины тока I на число витков катушки w называют намагничивающей силой, или ампервитками. Они являются мерилом намагничивающей силы катушки. Ампервитки, приходящиеся на 1 *см* длины катушки, называют напряженностью магнитного поля H:

$$H=\frac{Iw}{l}\ \frac{a\cdot витки}{м}\ \text{или}\ a/м, \tag{53}$$

то есть 1 $a\cdot виток/м=1\ a/м$,
где l — длина катушки.

Напряженность, рассчитанная по формуле (53), соответствует напряженности внутри цилиндрической катушки. Вне катушки в результате рассеяния магнитных силовых линий напряженность меньше примерно в 2 раза. Если катушку замкнуть в виде кольца, то силовые линии замкнутся по кругу без рассеивания, и тогда формула (53) будет верна для любой точки такой катушки (тороида).

Магнитная индукция, или интенсивность магнитного поля B в катушке с воздушным сердечником

$$B_0=\mu_0 H, \tag{54}$$

где $\mu_0=4\pi 10^{-7}\ гн/м=1{,}256\cdot 10^{-6}\ гн/м$ — магнитная постоянная (магнитная проницаемость свободного пространства, или вакуума).

Если внутрь катушки ввести железный сердечник, то при тех же витках и величине тока магнитная индукция,

или интенсивность магнитного поля, возрастет в значительной мере. Причина этого явления заключается в том, что молекулярные токи в железе под действием магнитного поля ориентируются относительно этого поля. Молекулярные магнитные поля при этом совпадают с внешним магнитным полем и усиливают его. Способность к увеличению интенсивности магнитного поля зависит от свойств материала сердечника и характеризуется относительной магнитной проницаемостью, обозначаемой μ:

$$\mu = \frac{\text{Интенсивность магнитного поля с сердечником}}{\text{Интенсивность магнитного поля без сердечника}} = \frac{B}{B_0} \qquad (55)$$

и является безразмерной величиной. Для воздуха значение μ принимают равным 1 (более точно для воздуха $\mu = 1{,}00000036$).

Произведение $\mu_0\mu = \mu_a$ называется абсолютной магнитной проницаемостью. Тогда магнитная индукция B для катушки с сердечником

$$B = \mu_a \cdot H = \mu_0 \cdot \mu \cdot H, \qquad (56)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Единицей измерения магнитной индукции является т е с л а (*тл*):

$$1\ тл = 1\ вб/м^2 = 1\ в \cdot сек/м^2.$$

Устаревшая, но широко применяемая в технической литературе единица измерения магнитной индукции гаусс (*гс*) $1\ гс = 10^{-4}\ тл$.

П р и м е р. Определить напряженность магнитного поля внутри сравнительно длинной катушки, если число витков равно $w = 300$, длина катушки $l = 0{,}5\ м$, а ток катушки $I = 0{,}6\ а$. Определить также магнитную индукцию B, если в катушку введен сердечник с $\mu = 7000$.

Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{Iw}{l} = \frac{0{,}6 \cdot 300}{0{,}5} = 360\ а/м\ (3{,}6\ а/см).$$

Магнитная индукция в сердечнике

$$B = \mu_0\mu H = 4\pi 10^{-7} \cdot 7000 \cdot 360 = 3{,}17\ тл.$$

§ 4. Магнитные свойства материалов

Все существующие материалы по своим магнитным свойствам делятся на парамагнетики, диамагнетики и ферромагнетики.

Парамагнетики усиливают внешнее магнитное поле, так как молекулярные токи в веществе ориентируются так, что создаваемое ими магнитное поле совпадает с внешним. К парамагнетикам относятся олово (магнитная проницаемость равна 1,000004), марганец (1,0037), платина (1,000364), алюминий (1,000023), вольфрам, воздух и др.

Диамагнетики — это вещества, молекулярные токи которых ориентируются так, что создаваемое ими магнитное поле ослабляет внешнее магнитное поле. К ним относятся медь (магнитная проницаемость равна 0,999991),

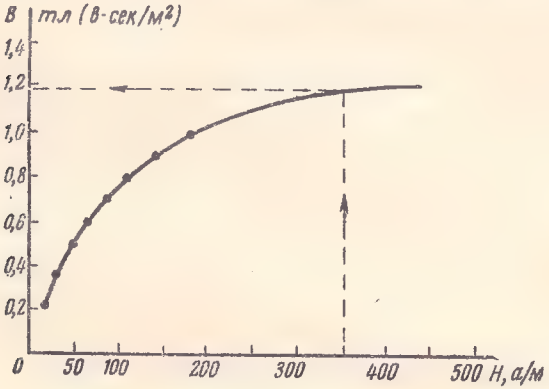


Рис. 24. Кривая намагничивания стали Э42.

серебро (0,999981), графит (0,999895), цинк, кадмий, висмут, сурьма, вода и др.

Ферромагнетики значительно усиливают внешнее магнитное поле, причем магнитная проницаемость меняется в зависимости от напряженности поля и от характера обработки материала. Ферромагнетики — это железо, сталь, чугун, никель, кобальт и некоторые сплавы.

Относительная магнитная проницаемость парамагнетиков и диамагнетиков близка к единице и практически не меняется при изменении напряженности поля H.

На рисунке 24 по данным таблицы 6 построена кривая намагничивания для стали Э42. Такими кривыми удобно пользоваться при расчетах.

Таблица 6

Характеристики намагничивания ферромагнитных материалов

Магнитная индукция (*тл*)	Напряженность магнитного поля H (*а/м*)			
	электротехническая сталь Э42	электротехническая сталь Э11	мягкая кованая сталь Ст2	чугун
0,2	21	87	160	900
0,4	37	140	320	1 640
0,6	63	211	488	2 940
0,8	110	318	682	5 400
1,0	185	502	924	10 100
1,2	380	843	1 290	19 200
1,4	1 450	1 580	2 090	34 800
1,6	5 600	4 370	4 100	—
1,8	14 600	12 800	—	—
2,0	41 000	31 000	—	—

Как видно из данной таблицы, характеристики намагничивания ферромагнитных материалов меняются в широких пределах. Лучшими намагничивающими свойствами обладает электротехническая сталь Э42. Чтобы обеспечить в ней магнитную индукцию 0,6 *тл*, необходимо создать напряженность внешнего поля, равную 63 *а/м*. Такая же по величине магнитная индукция в чугуне будет обеспечена лишь при напряженности внешнего поля, равной 2940 *а/м*.

Индукция B в ферромагнитном сердечнике складывается из индукции B_0 внешнего магнитного поля и индукции J магнитного поля ферромагнитной среды — **намагниченности** среды:

$$B = B_0 + J = \mu_0 H + J. \tag{57}$$

В то же время

$$B = \mu_a H, \tag{58}$$

отсюда следует, что

$$\mu_a = \mu_0 + \frac{J}{H}, \tag{59}$$

то есть магнитная проницаемость вещества равна сумме магнитной проницаемости вакуума μ_0 и некоторой добавочной магнитной проницаемости, равной отношению намагниченности J к напряженности H внешнего магнитного поля.

Намагниченность среды не может возрастать бесконечно. При некотором значении напряженности H поля наступает магнитное насыщение $J_{нас}$, при котором дальнейшее увеличение напряженности H практически не приводит к увеличению магнитной индукции B. Графически процесс насыщения представлен на рисунке 25. Из графика видно, что для ферромагнетиков относительная магнитная проницаемость не является постоянной величиной, а зависит от напряженности поля H. Каждый ферромагнитный материал имеет характерную для него кривую намагничивания. Этими кривыми пользуются при расчете магнитных цепей электрических машин и аппаратов.

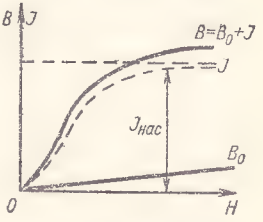


Рис. 25. Кривая намагничивания и ее составляющие.

§ 5. Магнитный поток

Магнитным потоком Φ называют произведение магнитной индукции B на площадь сечения S сердечника катушки:

$$\Phi = B \cdot S \ вб. \tag{60}$$

Пример. Найти магнитный поток Φ катушки, длина которой $l=0{,}5$ $м$, число витков $w=300$, ток в катушке $I=0{,}6$ $а$, сердечник из электротехнической стали Э42 сечением 10 $см^2$ (10^{-3} $м^2$).

1. Определяем напряженность магнитного поля:

$$H = \frac{wI}{l} = \frac{300 \cdot 0{,}6}{0{,}5} = 360 \ а/м.$$

2. По кривой намагничивания (рис. 24) находим магнитную индукцию при $H=360$ $а/м$:

$$B \approx 1{,}2 \ тл,$$

3. Определяем магнитный поток Φ:

$$\Phi = B \cdot S = 1{,}2 \cdot 10^{-3} \ вб.$$

§ 6. Остаточный магнетизм. Потери на перемагничивание

На рисунке 26 показано, как растет индукция B в ферромагнитном сердечнике с увеличением тока в катушке, то есть напряженности поля H:

$$B = \mu_a H = \mu_a \frac{wI}{l} \ тл, \tag{61}$$

где w — витки;
I — сила тока;
$\mu_а$ — магнитная проницаемость;
l — длина.

Если сердечник довести до насыщения (магнитная индукция максимальная $B_м$ в точке A), а затем, уменьшая ток в сердечнике, размагничивать сталь, то магнитная индукция будет уменьшаться по новой кривой до точки C. Эта точка соответствует моменту, когда ток в катушке равен нулю ($H=0$). Однако индукция в сердечнике не снизилась до нуля, а имеет некоторую величину $B_г$. Эта индукция носит название остаточной магнитной индукции. Явление отставания магнитной индукции B от намагничивающей силы H называют гистерезисом.

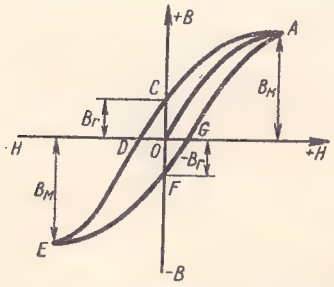


Рис. 26. Циклическая кривая перемагничивания (петля гистерезиса).

Чтобы сталь полностью размагнитить, в катушке нужен ток обратного направления, который создал бы напряженность, равную отрезку OD. Чем больше этот отрезок, тем больше требуется энергии на размагничивание. Отрезок OD характеризует собой сопротивляемость стали размагничиванию и называется задерживающей (коэрцитивной) силой. Если и дальше увеличивать ток в катушке, индукция снова возрастет до величины насыщения ($-B_м$), но с измененным направлением магнитных силовых линий.

Размагничивая в обратном направлении, получим остаточную индукцию ($-B_г$). Увеличивая ток через катушку в первоначальном направлении, снова придем в точку A.

Кривая $ACDEFGA$ называется циклической кривой перемагничивания, или петлей гистерезиса.

На перемагничивание расходуется энергия, которая превращается в тепло. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше потери на перемагничивание и тем больше выделяется тепла в сердечнике. Поэтому во из-

бежание непроизводительных потерь в стали на нагрев ее стремятся выбирать с относительно малой площадью петли гистерезиса.

§ 7. Магнитные материалы

Магнитные материалы, применяемые в электротехнике, делятся на магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы характеризуются высокой относительной магнитной проницаемостью μ и малой задерживающей (коэрцитивной) силой, то есть малыми потерями на перемагничивание. Поэтому их используют для изготовления сердечников электромагнитов, полюсных наконечников и т. д. Для уменьшения потерь на вихревые токи (см. гл. V, § 5) сердечники выполняют из отдельных пластин стали, изолированных друг от друга. Для увеличения удельного сопротивления стали к ней прибавляют несколько процентов кремния. Такая листовая сталь с повышенным содержанием кремния (до 4%) называется электротехнической.

К магнитно-мягким материалам относятся также магнетодиэлектрики и ферриты. Они очень хорошо проводят магнитные потоки и имеют малую электропроводность, что ведет к снижению потерь энергии в них. Ферриты относятся к полупроводникам. Магнетодиэлектрики изготавливают из мелкого железного порошка. Связующим материалом является электроизолирующий лак. Наиболее распространенные магнетодиэлектрики: карбонильное железо, пермаллой, альсифер, магнетит и др. Начальная относительная магнитная проницаемость μ у карбонильного железа равна 2000—3000, а максимальная магнитная проницаемость при магнитной индукции насыщения $B_{нас}=2$ *тл* составляет $\mu=20\,000 \div 21\,000$. У пермаллоя μ меняется от 10 000 до 100 000, у альсифера — от 10 000 до 110 000 и т. д.

Ферриты представляют собой соединение окислов железа с металлами — никелем, цинком и др. Ферриты значительно превосходят по своим свойствам магнетодиэлектрики, так как имеют очень высокое удельное сопротивление и значительно бóльшие начальную и максимальную магнитные проницаемости.

Магнитно-твердые материалы имеют небольшую магнитную проницаемость μ, высокую остаточную магнитную индукцию B_r и большую задерживающую

(коэрцитивную) силу H_c. Поэтому из них изготавливают постоянные магниты, применяемые в технике связи и электроизмерительной технике. Наиболее распространены магнитно-твердые материалы из вольфрамовых, хромовых и кобальтовых сталей, имеющих задерживающую силу H_c порядка 5000—14 000 *а/м* и остаточную магнитную индукцию B_r, равную 0,8—1,0 *тл*.

Магнитно-твердые материалы из сплавов альни, альниси, альнико, магнико имеют $H_c = 40\,000 \div 64\,000$ *а/м* и $B_r = 0{,}5 \div 1{,}25$ *тл*. Благодаря высоким магнитным свойствам этих сплавов постоянные магниты из них получаются значительно меньше по размерам (в 10—15 раз), чем постоянные магниты из вольфрамовой, кобальтовой и других сталей.

§ 8. Закон Ома для магнитной цепи и ее расчет

Как в электрической цепи величина тока зависит от величины приложенного напряжения и от сопротивления, оказываемого элементами цепи, так и в магнитной цепи магнитный поток Φ зависит от приложенных намагничивающей силы Iw в ампер-витках и от сопротивления $R_м$ магнитному потоку:

$$\Phi = \frac{Iw}{R_м}. \tag{62}$$

Это равенство называют законом Ома для магнитной цепи.

Магнитное сопротивление $R_м$ определяют в зависимости от длины силовых линий l *м*, площади поперечного сечения силового потока S *м*^{2} и абсолютной магнитной проницаемости μ_a *вб/а·м*:

$$R_м = \frac{l}{\mu_a S}. \tag{63}$$

Нетрудно уловить аналогию равенств (63) и (32) — выражения сопротивления проводника.

Подставив в равенство (62) вместо $R_м$ его значение из (63), получим:

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l}{\mu_a S}} = \frac{Iw\mu_a S}{l}. \tag{64}$$

Ниже приводится расчет магнитной цепи, представленной на рисунке 27.

Магнитный поток замыкается через сердечник и воздушный зазор δ. Отдельные участки сердечника могут быть выполнены из различных материалов и различного сечения. Через сечение каждого из участков сердечника проходит один и тот же магнитный поток Φ:

$$\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2 = B_3 S_3$$

и т. д.

По закону Ома, для магнитной цепи

$$\Phi = \frac{\Sigma I w}{\Sigma R_м}, \qquad (65)$$

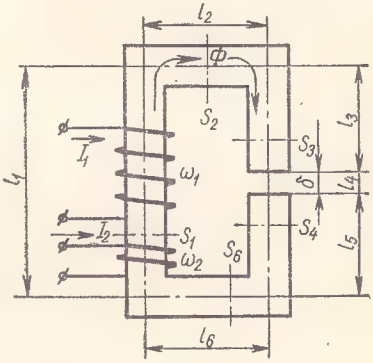


Рис. 27. Магнитная цепь.

где $\Sigma I w$ — алгебраическая сумма намагничивающих сил (ампер-витков);

$\Sigma R_м$ — сумма магнитных сопротивлений участков, на которых индукция B и напряженность H являются постоянными.

Пользуясь формулой (63), для магнитной цепи, показанной на рисунке 27, можно найти

$$\Sigma R_м = R_{м1} + R_{м2} + R_{м3} + \ldots + R_{м6} = \frac{l_1}{\mu_{a1} S_1} + \frac{l_2}{\mu_{a2} S_2} + \ldots + \frac{l_6}{\mu_{a6} S_6}, \qquad (66)$$

где μ_{a1}, μ_{a2}, ... μ_{a6} — магнитные проницаемости участков магнитной цепи. После подстановки значения $\Sigma R_м$ из (66) в (65)

$$\Phi = \frac{\Sigma I w}{\frac{l_1}{\mu_{a1} S_1} + \frac{l_2}{\mu_{a2} S_2} + \ldots + \frac{l_6}{\mu_{a6} S_6}},$$

откуда

$$\frac{\Phi l_1}{\mu_{a1} S_1} + \frac{\Phi l_2}{\mu_{a2} S_2} + \ldots + \frac{\Phi l_6}{\mu_{a6} S_6} = \Sigma I w. \qquad (67)$$

Ввиду того, что

$$\frac{\Phi}{S_1} = B_1; \quad \frac{\Phi}{S_2} = B_2,$$

а также, что

$$\frac{B_1}{\mu_{a1}} = H_1; \quad \frac{B_2}{\mu_{a2}} = H_2 \text{ и т. д.},$$

равенство (67) принимает следующий вид:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots + H_6 l_6 = I_1 w_1 + I_2 w_2 + \ldots, \qquad (68)$$

где величины $H_1 l_1$; $H_2 l_2$ и т. д. называются **магнитными напряжениями**.

Порядок расчета магнитной цепи следующий.

1. По заданному магнитному потоку Φ и поперечным сечениям S отдельных участков сердечника определяют магнитные индукции в участках:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2} \text{ и т. д.}$$

2. Находят напряженности магнитного поля H для различных участков сердечника, пользуясь кривыми (или таблицами) намагничивания для материала сердечника.

3. Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре H подсчитывают так:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{1{,}256 \cdot 10^{-6}} \approx 8 \cdot 10^5 B_0 \; а/м.$$

4. Определяют магнитные напряжения во всех участках цепи:

$$H_1 l_1; \quad H_2 l_2 \text{ и т. д.}$$

5. Потребную намагничивающую силу или полные ампер-витки находят как сумму магнитных напряжений:

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots + H_n l_n.$$

6. Определив ампер-витки Iw и задавшись величиной тока I в катушке, находят число витков катушки:

$$w = \frac{Iw}{I}.$$

§ 9. Электромагниты и их применение

Электрические магниты находят самое широкое применение в различных аппаратах, применяемых в электротехнике, телефонии, радиотехнике и других отраслях техники. Это электромагнитные выключатели, различные реле, магнитные муфты, магнитные подъемники и т. д.

Электромагнитные муфты заменяют фрикционные для включения нагрузки на двигатель. Применяются в автомобилях, тепловозах, поршневых компрессорах, на судах и т. д. Они подразделяются на муфты трения и муфты скольжения. Электромагнитные муфты трения состоят из ведущей и ведомой половин, притягивающихся под действием магнитного поля при включении катушек. В некоторых муфтах трения воздушный зазор между их половинами заполнен магнитным материалом, состоящим из смеси ферромагнитного порошка и порошкообразного или жидкого диэлектрика. Под действием магнитного поля вязкость этой смеси очень сильно возрастает, чем обеспечивается надежное сцепление.

Устройство электромагнитной муфты скольжения рассматривается в гл. XI, § 11.

Подъемные магниты применяются для захвата чугунных и стальных деталей при подъеме и перемещении их с помощью кранов. Эти магниты изготавливают на разную подъемную силу. Отдельные из них способны поднимать стальные болванки весом до 15—20 *т*.

Подъемная сила электромагнита. Если сечение стального сердечника равно S *см*^{2}, магнитная индукция между плоскостями сердечника и поднимаемой детали равна B *тл*, то подъемная сила P определится так:

$$P = \frac{SB^2}{2{,}55} 10^6 \text{ н} = \frac{SB^2}{25} 10^6 \text{ кГ}. \qquad (69)$$

Пример. Определить подъемную силу P электромагнита, имеющего $S = 10$ *см*^{2} (10^{-3} *м*^{2}) и магнитную индукцию $B = 0{,}2$ *тл*:

$$P = \frac{10^{-3} \cdot 0{,}2^2}{2{,}55} \cdot 10^6 = 15{,}7 \text{ н},$$

или

$$P = \frac{15{,}7 \text{ н}}{9{,}81} = 1{,}6 \text{ кГ}.$$

§ 10. Проводник с током в магнитном поле

Если в поле магнита (или электромагнита) поместить проводник с током, который создает свое собственное магнитное поле, то оба магнитных поля, взаимодействуя, будут выталкивать проводник из поля. Как видно на рисунке 28, *а*, магнитные силовые линии поля и проводника

слева от него совпадают по направлению, и их густота здесь больше, чем справа от проводника, где магнитные силовые линии проводника идут навстречу линиям поля и ослабляют друг друга. Проводник выталкивается из магнитного поля вправо. Если поменять направление тока в проводнике (рис. 28,*б*), то сила выталкивания также изменит свое направление.

Сила F(*н*), с которой поле действует на проводник, определяется так:

$$F = BIl, \qquad (70)$$

где B — магнитная индукция поля (*тл*):

I — сила тока в проводнике (*а*);

l — действующая в поле длина проводника (*м*).

Для определения направления силы выталкивания проводника с током из магнитного поля применяют п р а-

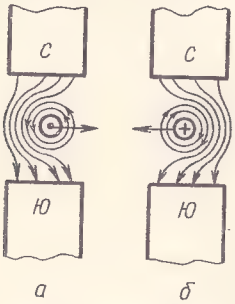


Рис. 28. Взаимодействие магнитного поля и проводников с током. Знак • показывает, что ток идет к нам (*а*), знак + показывает, что ток идет от нас (*б*).

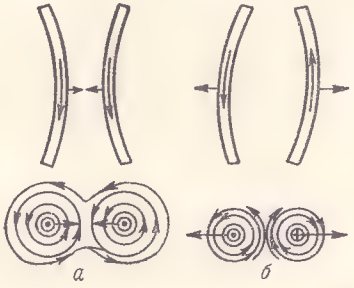


Рис. 29. Взаимодействие проводников с током.

в и л о л е в о й р у к и: *если расположить левую руку так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока в проводнике, то большой палец укажет направление действия силы, приложенной к проводнику.*

Если два проводника под током расположить рядом друг с другом, то их магнитные поля будут взаимодействовать. Если токи в двух параллельных проводах направлены одинаково (рис. 29,*а*), то проводники притягиваются. Если токи направлены в разные стороны, проводники отталкиваются.

Сила F взаимодействия проводников с током определяется так:

$$F = \frac{2I_1 I_2 l}{a} 10^{-7} \text{ н}, \qquad (71)$$

где I_1 и I_2 — силы тока в проводниках (a);
l — длина, вдоль которой проводники взаимодействуют ($м$);
a — расстояние между осями проводников.

Как видно из формулы (71), если токи в проводниках равны, сила взаимодействия пропорциональна квадрату тока. Поэтому при коротких замыканиях в обмотках электрических аппаратов возникают очень большие усилия между витками, приводящие к механическим повреждениям аппаратов.

Пример. Определить силу взаимодействия F двух проводов с током $I=100$ $а$ в каждом, если расстояние между их центрами $a=0{,}02$ $м$ на протяжении $l=1$ $м$:

$$F = \frac{2 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 10^{-7}}{0{,}02} = 0{,}1 \text{ н} = \frac{0{,}1}{9{,}81} \text{ кГ}.$$

Глава V

Превращение механической энергии в электрическую. Электромагнитная индукция

§ 1. Генераторы трибоэлектричества. Пьезоэлектричество

Трибоэлектричество — электрические заряды, возникающие в результате трения. При трении двух диэлектриков друг о друга положительно заряжается тот, у которого большая диэлектрическая проницаемость. Металлы при трении о диэлектрик получают отрицательный заряд.

Явление электризации тел при трении использовано в машинах для получения электрических зарядов на изолированных от земли проводниках.

Генератором трибоэлектричества может стать обычная ременная передача. Ремень при трении о шкивы заряжается положительно, а металлические корпуса машин — отрицательно. Для практических целей генераторы три-

боэлектричества пока не нашли широкого применения, так как получаемые с их помощью заряды имеют очень небольшой запас энергии, обычно используемый для получения искры.

Пьезоэлектричество — это возникновение зарядов на поверхности кристалла при его деформации под действием механических усилий. Это явление свойственно кристаллам пьезоэлектриков: кварца, турмалина, сегнетовой соли и т. п. Явление пьезоэлектричества обратимо: если к кристаллу пьезоэлектрика подвести напряжение, меняющееся по величине и по знаку, то кристалл будет испытывать деформацию растяжения и сжатия. Пьезоэлектрические кристаллы находят широкое применение в измерительной технике, радиотехнике, акустике, в устройствах для преобразования механической энергии в электрическую (например, при измерении неэлектрических величин электрическими способами) или электрической энергии в механическую (например, в громкоговорителях, где электрический ток звуковой частоты превращается в механические звуковые колебания).

Из пьезоэлектриков (свинцово-циркониево-титановой керамики) выполнены опытные приборы для зажигания рабочей смеси в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания. Прижимая два стерженька из указанного пьезоэлектрика друг к другу, получают электрическую искру напряжением 30 000 *в*.

§ 2. Электромагнитная индукция

Если в магнитном поле перемещается проводник таким образом, что он пересекает магнитные силовые линии, то в нем индуктируется электродвижущая сила (э. д. с.). Направление этой э. д. с. определяется правилом правой руки (рис. 30): *если ладонь правой руки расположить в магнитном поле навстречу магнитным силовым линиям так, чтобы большой палец указывал направление перемещения проводника, то остальные четыре вытянутые пальца покажут направление индуктируемой э. д. с.*

Величина индуктируемой э. д. с. E *в* в прямолинейном проводнике пропорциональна величине магнитной индукции B *тл*, скорости перемещения проводника v *м/сек* и активной длине проводника l *м*, которая пересекается магнитными силовыми линиями:

$$E = Bvl. \qquad (72)$$

Если проводник пересекает магнитные силовые линии под некоторым углом α (рис. 31), то величина индуктируемой э. д. с. определяется так:

$$E = Bvl \sin \alpha. \qquad (73)$$

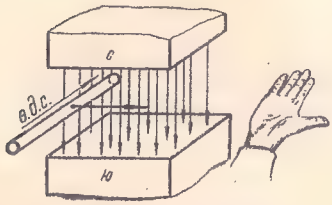


Рис. 30. Направление э. д. с., индуктируемой в проводнике.

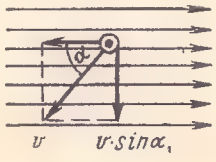


Рис. 31. Проводник пересекает силовые линии магнитного поля под углом.

Если угол $\alpha = 0$, то $\sin \alpha = 0$ и э. д. с. $E = 0$. В этом случае проводник перемещается вдоль магнитных силовых линий, не пересекая их.

Пример. Определить индуктируемую э. д. с. в проводнике длиной 0,5 *м*, который перемещается перпендикулярно силовым линиям в однородном магнитном поле, имеющем магнитную индукцию $B = 1$ *тл*, со скоростью $v = 3$ *м/сек*:

$$E = Blv = 1 \cdot 0{,}5 \cdot 3 = 1{,}5 \text{ в}.$$

Если внутри катушки перемещают магнит, как это показано на рисунке 32, то витки катушки пересекаются магнитными силовыми линиями и в них индуктируется э. д. с. Направление тока в замкнутой цепи показывает чувствительный измерительный прибор. При неподвижном магните витки не пересекаются магнитными силовыми линиями и э. д. с. в них не возникает. При обратном движении магнита (рис. 32, *б*) направление наводимой э. д. с. меняется. Максимальное отклонение стрелка измеритель-

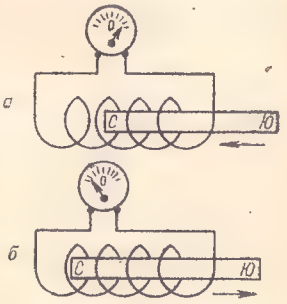


Рис. 32. Изменение охватываемого катушкой магнитного потока.

ного прибора испытывает при прохождении полюса магнита в центре катушки.

Если перемещать катушку в магнитном поле другой катушки, в которой протекает ток (рис. 33), то в результате изменения суммарного магнитного потока, охватываемого витками катушки *2*, в ней индуктируется э. д. с. Направление ее зависит от направления перемещения катушки.

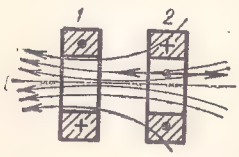


Рис. 33. Наведение э. д. с. в катушке *2*, перемещаемой в магнитном поле катушки *1*.

Если катушки оставить неподвижными одну относительно другой, а в катушке *1* менять силу тока, например включая и выключая его, то в результате появления и исчезновения магнитного поля, которое воздействует на витки катушки *2*, в ней возникает э. д. с.

Если ток в катушке *1* не меняется, то не меняется и магнитный поток, охватываемый катушкой *2*, и в ней не индуктируется э. д. с. Если к катушке *1* подведен переменный ток, например от сети с частотой 50 *герц*, то во второй катушке индуктируется э. д. с., меняющая свое направление с такой же частотой.

В замкнутой электрической цепи с индуктированной в ней э. д. с. течет индуктированный ток. Направление тока устанавливают п р а в и л о м Л е н ц а: *индуктированный в проводнике (контуре) ток возникает всякий раз такого направления, что его магнитное поле противодействует причине, вызвавшей его.* Иными словами, правило Ленца показывает, что ток, возникший в замкнутой цепи, образует свое собственное магнитное поле, которое имеет направление, противоположное направлению основного — первичного магнитного поля, породившего этот ток, и ослабляет основное поле.

Электродвижущая сила, индуктируемая в катушке, с учетом правила Ленца может быть выражена следующим равенством:

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} w, \qquad (74)$$

где $\Delta\Phi$ — величина, на которую меняется магнитный поток, охватывающий витки катушки, за отрезок времени Δt. $\Delta\Phi$ берется в *вб*, а Δt — *в сек*; w — число витков в катушке.

Знак «минус» в соответствии с правилом Ленца учитывает противодействующее влияние индуктированной э. д. с. Так как ток, индуктированный в проводнике (контуре), возникает всякий раз такого направления, при котором он противодействует причине, вызвавшей его, то необходимо прилагать определенное усилие, чтобы перемещать замкнутый контур в магнитном поле.

Это усилие можно определить исходя из следующих соображений. Механическая мощность $P_м$ передвижения контура, к которому приложена сила F при скорости передвижения v *м/сек*:

$$P_м = Fv \; вт \; ([Fv] = н \cdot м/сек = дж/сек = вт). \qquad (75)$$

По закону сохранения энергии, эта мощность должна быть равна электрической мощности в контуре, в котором индуктируется э. д. с. E и протекает ток I:

$$P_м = P_э = EI = Fv, \qquad (76)$$

откуда

$$F = \frac{EI}{v}, \qquad (77)$$

но

$$E = Blv.$$

Тогда, подставляя значение E в формулу (77), получим:

$$F = \frac{BlvI}{v} = BlI, \qquad (78)$$

где B — магнитная индукция (*тл*);
l — активная длина проводника (*м*);
I — ток в контуре (*а*);
F — сила, которая приложена к контуру (*н*).

Если контур разомкнут, то есть ток равен нулю, для перемещения контура необходимо затратить усилие на преодоление механического трения и сопротивления воздуха. Если в магнитное поле поместить проводник с током, он будет выталкиваться из поля с усилием, которое можно определить по формуле (78).

§ 3. Самоиндукция. Индукционная аппаратура

Как уже рассматривалось выше, по формуле (74), индуктируемая в катушке электродвижущая сила

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} w,$$

где магнитный поток Φ может быть создан посторонним контуром или самой катушкой путем ее включения в цепь тока или выключения. Например, в момент включения магнитный поток вырастает от нуля до некоторого установившегося значения Φ. Возникающие магнитные силовые линии пересекают витки катушки. При этом в катушке индуктируется электродвижущая сила. После размыкания цепи катушки магнитный поток исчезает. Магнитные силовые линии пересекают витки катушки при своем исчезновении. При этом в катушке снова индуктируется э. д. с. Это явление называется **самоиндукцией**, а наводимая в катушке э. д. с. **электродвижущей силой самоиндукции**.

Произведение величины магнитного потока Φ *вб*, пронизывающего витки катушки, на число витков катушки w называется **потокосцеплением** ψ:

$$\psi = w\Phi, \tag{79}$$

Если катушка не имеет ферромагнитного сердечника, то потокосцепление пропорционально силе тока I в катушке:

$$\psi = w\Phi = LI,$$

где L — коэффициент пропорциональности, называемый **индуктивностью** катушки.

Размерность индуктивности определяется из равенства

$$[L] = \frac{[w\Phi]}{[I]} = \frac{вб}{а} = \frac{в \cdot сек}{а} = ом \cdot сек = гн.$$

Зная индуктивность катушки L *гн*, число витков w, величину постоянного тока I *а*, можно определить величину магнитного потока

$$\Phi = \frac{LI}{w} \; вб. \tag{80}$$

Подставляя значение Φ в формулу (74), получим:

$$E = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}. \tag{81}$$

Принцип индуктирования электродвижущей силы в момент включения и выключения цепи постоянного тока с катушкой используется в различных индукционных аппаратах: зуммерах, применяемых в фонических телефонных аппаратах, индукционных аппаратах для получения искры (рис. 34), в бобинах — индукционных устройствах

для осуществления зажигания в карбюраторных двигателях.

Индукционный аппарат имеет две обмотки, расположенные на одном общем сердечнике. Первичная обмотка *I* имеет сравнительно небольшое число витков и выполнена более толстым проводом. Вторичная обмотка *II* выполнена тонким проводом с большим числом витков.

Индукционный аппарат работает следующим образом. При включении выключателя *В* ток обтекает первичную обмотку *I*. Сердечник намагничивается и притягивает якорь *Я*. Прерыватель *Пр* размыкает цепь первичной обмотки. Магнитный поток, запасенный в момент включения, исчезает. Его силовые линии пересекают витки вторичной обмотки *II* и наводят в ней э. д. с. При исчезновении магнитного поля якорь *Я* возвращается вверх (по рисунку), и снова прерыватель замыкается, катушка *I* оживляется током, притягивается якорь *Я* и т. д.

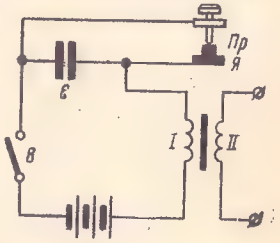


Рис. 34. Схема индукционного аппарата:
В — выключатель; *Пр* — прерыватель; *Я* — якорь; *С* — конденсатор; *I* и *II* — первичная и вторичная обмотки.

С помощью верхнего винтового контакта прерывателя *Пр* можно регулировать частоту прерываний цепи в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен в секунду (в зуммерах).

Конденсатор *С*, включенный параллельно контактам прерывателя, служит для уменьшения искрения прерывателя, а также способствует более быстрому изменению (нарастанию и исчезновению) магнитного потока, а следовательно, и наведению более высокой э. д. с. во вторичной обмотке.

В связи с тем что магнитный поток в момент замыкания цепи катушки *I* нарастает медленнее, чем он исчезает при размыкании катушки, электродвижущая сила, индуктируемая в катушке при размыкании, больше, чем э. д. с., индуктируемая при замыкании.

Индукционный аппарат — датчик электрических импульсов высокого напряжения входит в состав комплекта электроизгороди, применяемой для ограждения всех видов домашних животных и птицы. На рисунке

35 представлена схема датчика импульсов высокого напряжения электрической изгороди ЭП. При включении выключателя *1* по обмотке *2* катушки протекает ток, намагничивающий сердечник. К сердечнику притягивается стальной якорь *4*, который при этом отбрасывает рычаг *5* маятника *6* (пунктиром показан путь рычага маятника). В момент размыкания якоря *4* с рычагом *5* цепь катушки *2* размыкается и магнитное поле, образовавшееся перед этим в катушке и сердечнике, мгновенно исчезает. В обмотке *2* индуктируется э. д. с., под действием которой возникает зарядный ток в конденсаторе *C*. Во вторичной многовитковой обмотке *3* индуктируется высоковольтный импульс (5 и более киловольт). Конденсатор *C* способствует образованию колебательного процесса в цепи первичной обмотки *2* и, следовательно, появлению серии кратковременных импульсов в обмотке *3*. Эта серия импульсов продолжается несколько тысячных долей секунды. Спустя 0,5—1 *сек* после предыдущего размыкания якоря *4* и рычага *5* маятник *6* под действием пружины *7* поворачивается влево и рычаг *5* снова замыкается с якорем *4*. Снова оживляется током катушка *2*, притягивается якорь *4*, и происходит размыкание цепи катушки *2*. Следует очередная серия импульсов в катушке *3*.

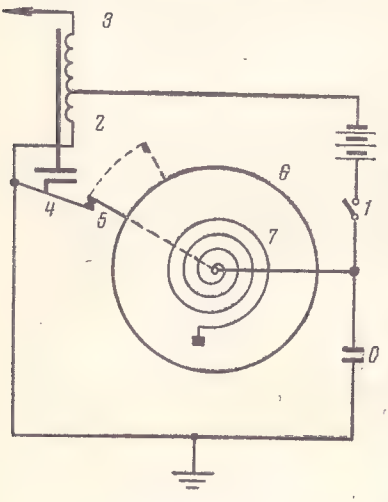


Рис. 35. Схема датчика импульсов электроизгороди:

1 — выключатель; *2* — первичная обмотка индукционной катушки; *3* — вторичная обмотка; *4* — якорь; *5* — рычаг маятника; *6* — диск маятника; *7* — пружина маятника.

Один конец этой катушки подводят к проводу электроизгороди, а второй конец через катушку *2* заземляют. Если животное коснется провода, то замыкается цепь тока: катушка *3* — животное — земля — катушка *2*. Животное получает электрический удар. Натяжением пружины *7* можно регулировать частоту импульсов. Номинальная

частота основных импульсов — *1—2* в секунду. При более частых размыканиях контактов быстро разряжается источник питания.

В качестве источника питания используют сухие элементы типа ЭС-Л-30 емкостью 30 *а·ч* и напряжением 1,5 *в*. Батарея, составленная из трех элементов, включенных последовательно, дает 4,5 *в*. Батарею помещают в закрытом металлическом кожухе, на одной из сторон которого имеется два зажима. К этим зажимам с внутренней стороны присоединяют концы батареи. Один конец присоединяют через выключатель. Комплект батарей может работать 1—2 месяца. Вместо сухих элементов можно использовать аккумуляторную батарею. При своевременной зарядке и правильной эксплуатации она надежно работает не менее трех лет.

Опоры электрической изгороди изготавливают из дерева, железных уголков или прутьев. Изоляторы для электроизгороди выполняют из фарфора, стекла, пластмассы. Широко используют также роликовые изоляторы типа РП-6, которые крепят к деревянным опорам гвоздями или шурупами, а к металлическим — винтами. На угловых опорах используют орешковые изоляторы.

В качестве провода для электроизгороди используют мягкую стальную оцинкованную проволоку диаметром 1—2 *мм*. Высота подвеса провода указывается в инструкции.

§ 4. Индуктивности катушек. Соединение индуктивностей

По своему устройству катушки могут быть однослойными и многослойными (рис. 36).

Индуктивность однослойной катушки (рис. 36, *а*) может быть определена по формуле

$$L = \frac{w\mu_a S}{l} \text{ гн}, \qquad (82)$$

где w — число витков катушки;

μ_a — магнитная проницаемость сердечника (*гн/м*);

l — длина катушки (*м*);

S — площадь поперечного сечения катушки ($м^2$),

$$S = \pi \frac{D^2}{4};$$

D — диаметр катушки (*м*).

Для многослойной цилиндрической обмотки (рис. 36, *б*) индуктивность может быть определена так:

$$L = m^2 L_{ср}, \qquad (83)$$

где m — число всех слоев обмотки катушки;
$L_{ср}$ — индуктивность однослойной катушки с диаметром

$$D_{ср} = \frac{D_{нар} + D_{вн}}{2}.$$

Если несколько катушек индуктивности соединены последовательно (рис. 37, *а*), то общая индуктивность всей цепи равна сумме индуктивностей отдельных катушек:

$$L_{об} = L_1 + L_2 + L_3. \qquad (84)$$

Если катушки соединены параллельно (рис. 37, *б*), то их суммарная индуктивность будет определена из равенства

$$\frac{1}{L_{об}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}. \qquad (85)$$

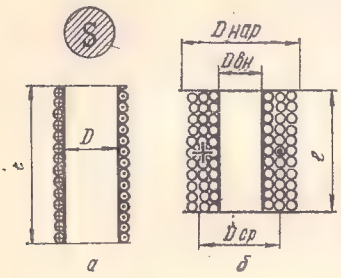


Рис. 36. Однослойная (*а*) и многослойная (*б*) катушки.

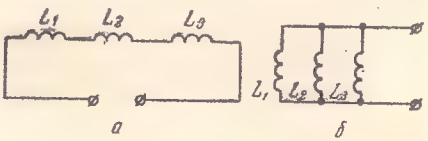


Рис. 37. Последовательное (*а*) и параллельное (*б*) соединение индуктивностей.

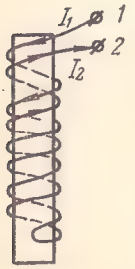


Рис. 38. Бифиллярная намотка катушки.

В ряде случаев требуется иметь, например, активное сопротивление R, выполненное проводом в виде катушки, и в то же время индуктивность такой катушки свести к нулю. В этих случаях применяют б и ф и л л я р н у ю н а м о т к у (рис. 38). В двух ветвях *1* и *2* этой катушки индуктируются э. д. с. разного направления, так как в разные стороны направлены токи в ветвях. Таким образом, при любом изменении тока в цепи э. д. с. самоиндукции равна нулю.

§ 5. Вихревые токи

В электрических приборах и машинах металлические детали иногда движутся в магнитном поле или неподвижные металлические детали пересекаются силовыми линиями меняющегося по величине магнитного поля. В этих металлических деталях индуктируется э. д. с. самоиндукции. Под действием этих э. д. с. в массе металлической детали протекают вихревые токи (токи Фуко), которые замыкаются в массе, образуя вихревые контуры токов $I_в$ (рис. 39, *а*).

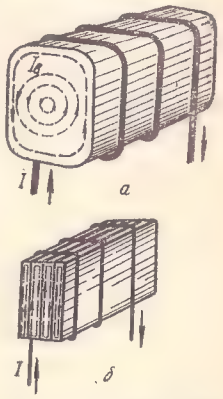


Рис. 39. Вихревые токи в сердечнике катушки.

Вихревые токи порождают свои собственные магнитные потоки, которые, по правилу Ленца, противодействуют магнитному потоку катушки и ослабляют его. Кроме того, они вызывают нагрев сердечника, что является бесполезной тратой энергии.

Чтобы уменьшить потери энергии, а также ослабить размагничивающее действие вихревых токов, сердечники катушек индуктивностей, а также магнитопроводы электрических машин набирают из отдельных листов электротехнической стали (гл. IV, § 7), изолированных друг от друга специальным лаком, бумагой или плохопроводящей пленкой окисла (окалиной). Сердечники некоторых катушек (бобин) набирают из кусков отожженной железной проволоки. Полоски железа располагают параллельно линиям магнитного потока. Вихревые же токи, протекающие в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного потока, ограничиваются изолирующими прокладками (рис. 39,*б*).

Для магнитопроводов приборов и устройств, работающих на высокой частоте, применяют магнетодиэлектрики (см. гл. IV).

Чтобы снизить вихревые токи в проводах, последние изготавливают в виде жгута из отдельных жил, изолированных друг от друга.

Полезное применение вихревые токи нашли в устройстве магнитного тормоза диска электрического счетчика. Вращаясь, диск пересекает магнитные силовые

линии постоянного магнита. В плоскости диска возникают вихревые токи, которые, в свою очередь, создают свои магнитные потоки в виде трубочек вокруг вихревого тока. Взаимодействуя с основным полем магнита, эти потоки тормозят диск.

Вихревые токи находят полезное применение также при индукционной плавке металлов и поверхностной закалке токами высокой частоты.

Глава VI

Однофазный переменный ток

§ 1. Получение переменного тока

Переменным током называется такой электрический ток, который периодически меняется по величине и направлению. Частным случаем переменного тока является пульсирующий ток: величина его меняется, а направление остается неизменным.

На рисунке 40 представлен простейший генератор переменного тока. Между полюсами магнита N и S принудительно с постоянной скоростью вращается виток провода $ВП$. Концы витка присоединены к медным, изолированным друг от друга кольцам $К$, на которые наложены щетки $Щ$, соединенные с внешней цепью, имеющей сопротивление R.

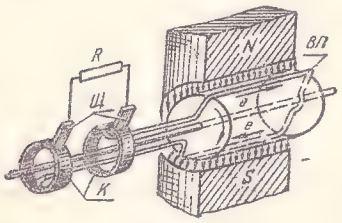


Рис. 40. Устройство простейшего генератора переменного тока:
ВП — виток провода; *К* — кольца; *Щ* — щетки; *R* — сопротивление внешней цепи.

Величина магнитного потока, который пересекает плоскость витка, меняется в зависимости от положения витка. Когда он расположен перпендикулярно магнитным силовым линиям, индуктируемая в нем э. д. с. равна нулю, так как обе активные стороны витка в этот момент не пересекают магнитных силовых линий. Мгновенное изменение магнитного потока равно нулю. При вертикальном поло-

жении витка мгновенное изменение магнитного потока максимальное. Индуктируемая э. д. с. также максимальна. Согласно формуле (73), величина э. д. с., индуктируемой в каждой из активных сторон витка, определяется так:

$$e_1 = Blv \sin \alpha.$$

Суммарная электродвижущая сила в витке

$$e = 2e_1 = 2Blv \sin \alpha,$$

где B — магнитная индукция магнитного поля (*тл*);
l — длина каждой из активных сторон витка (*м*);
v — линейная скорость движения активных сторон по окружности (*м/сек*);
α — угол, образованный плоскостью витка и горизонтальной нейтральной плоскостью.

При равномерном вращении витка в магнитном поле с угловой скоростью

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad (86)$$

$$e = 2Blv \sin \omega t,$$

где ω — угловая скорость, или угловая частота, показывающая, какой круговой путь совершает виток в секунду;
$\alpha = \omega t$ — фаза синусоидального тока;
t — время (*сек*).

Размерность угловой частоты

$$[\omega] = \frac{360^\circ}{T} = \frac{2\pi}{T} = \textit{град/сек} \text{ или } \textit{рад/сек},$$

где 2π — полный центральный угол окружности, выраженный в радианах, причем 2π *рад* $= 360^\circ$, а 1 *рад* $= 57^\circ 17'$; π *рад* $= 180^\circ$, $\frac{\pi}{2} = 90^\circ$ и т. д. Число $\pi = 3{,}14$.

Как следует из формулы (86), в витке индуктируется синусоидальная электродвижущая сила. Направление индуктируемой э. д. с. определяется правилом правой руки.

Изменение индуктируемой в витке э. д. с. по величине и направлению в виде синусоиды (рис. 41) можно представить себе следующим образом. В окружности отмечены углы поворота плоскости витка в магнитном поле полюсов. В нейтральной плоскости, когда угол поворота равен 0°,

э. д. с. в витке равна нулю. При увеличении угла поворота увеличивается число пересекаемых силовых линий и возрастает индуктированная э. д. с. При повороте плоскости витка на 90° индуктируемая э. д. с. максимальная. Она отложена справа на диаграмме в точке 90°. Ее направление принято за положительное. При изменении угла от 90 до 180° число магнитных силовых линий, пересекаемых плоскостью витка в единицу времени, уменьшается, снижается и индуктируемая э. д. с. В момент, когда угол поворота равен 180°, э. д. с. равна нулю. В дальнейшем при повороте плоскости витка от 180 до 270° число пересечений снова возрастает, но направление э. д. с. меняется, так как меняется направление перемещения активных сторон витка относительно магнитных силовых линий. При 270° э. д. с. максимальна по величине и равна э. д. с. при 90°, но противоположна по знаку, и т. д.

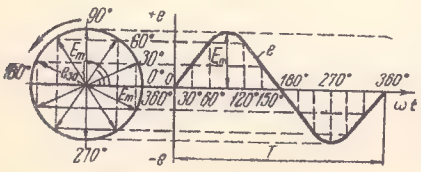


Рис. 41. Кривая мгновенных значений э. д. с.

В простейшей электрической цепи с активным сопротивлением величина электрического тока также меняется по синусоиде в соответствии с изменением э. д. с. Мгновенная величина силы тока в цепи в момент, когда э. д. с. равна нулю, также равна нулю. Когда э. д. с. максимальная, величина силы тока тоже максимальная.

Величина переменного тока (э. д. с., напряжения), соответствующая данному моменту времени (мгновению), называется мгновенным значением тока (э. д. с., напряжения). Максимальное мгновенное значение переменной величины, которого оно достигает в процессе своего изменения, называется амплитудой величины.

Если в момент времени $t=0$ ($\omega t=0$) мгновенное значение величины не равно нулю, то формула (например, для тока i) выглядит так:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi),$$

где $\omega t + \psi$ — фаза переменного синусоидального тока, а ψ — угол, называемый начальной фазой переменного синусоидального тока.

Мгновенные значения тока, напряжения, э. д. с. и других переменных величин принято обозначать соответствующими прописными символами: i, u, e и т. д. Действующие, или эффективные, значения, а также максимальные амплитудные значения обозначают заглавными символами I; U; E и I_m; U_m; E_m и т. д.

При расчете цепей переменного тока приходится выполнять арифметические действия с синусоидальными величинами, частоты которых одинаковы, а амплитуды и начальные фазы могут быть разные. Для облегчения действий применяется метод **векторных диаграмм**. Векторной диаграммой синусоидальной величины называется ее графическое изображение при помощи вращающегося вектора. Направление вращения векторов принимается против часовой стрелки. Если на рисунке 40 в плоскости витка изобразить вектор E_m (рис. 41) и представить его вращающимся вместе с рамкой, то в каждый момент времени мгновенное значение э. д. с. будет равно $e=E_m \sin \omega t$, то есть при $\omega t=0$, $e_0=0$;

$$\text{при } \omega t = 30°,\ e_{30} = E_m \sin 30° = \frac{E_m}{2} \text{ и т. д.}$$

Эти мгновенные величины могут быть получены непосредственно на вертикальной оси диаграммы как проекции на нее вектора E_m. Если на вертикальной оси нанесен масштаб э. д. с. или тока, то для любого момента времени ωt может быть получена мгновенная величина э. д. с., тока. Если вектор находится выше оси ωt, мгновенное значение величины принимается положительным; если вектор ниже оси ωt, мгновенное значение принимается отрицательным. Арифметические действия с векторами показаны ниже, при рассмотрении цепей переменного тока.

Векторы электрических величин дают нам представление не только об их абсолютном значении (об этой величине судят по длине вектора), но и об их взаимном расположении. Когда речь идет о векторных значениях тока, напряжения, э. д. с., то их обозначают теми же символами, что и выше, но с точкой наверху: $\dot{I}$, $\dot{U}$, $\dot{E}$.

§ 2. Частота колебаний переменного тока

Время T (рис. 41), в течение которого происходит один полный оборот рамки витка от 0 до 360°, а электродвижущая сила совершает полный цикл изменений, возвращаясь

к своей исходной точке, называется **периодом колебаний**. Число периодов в секунду (*пер/сек*) называется частотой f переменного тока:

$$f=\frac{1}{T}.$$

За единицу измерения частоты переменного тока принят 1 герц (*гц*); 1 *гц*=1 *пер/сек*.

Обычный сетевой переменный ток имеет частоту 50 *гц*. Это так называемая **промышленная частота** переменного тока. В радиопередатчиках и приемниках частоты переменного тока, на которых ведется радиопередача, измеряются тысячами, сотнями тысяч и миллионами герц (килогерцами, мегагерцами).

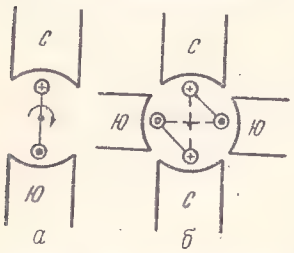


Рис. 42. Связь между частотой тока f и числом пар полюсов p:
а) $p=1$; *б*) $p=2$.

Частота переменного тока в рассмотренном выше генераторе зависит от скорости вращения витка в магнитном поле, а также от числа пар полюсов p. Например, если генератор имеет одну пару полюсов (рис. 42, *а*), то есть $p=1$, то для того, чтобы получить 50 *гц*, виток должен совершать 50 *об/сек* (оборотов в секунду), или $50\cdot 60=3000$ *об/мин*.

Если генератор имеет две пары полюсов (рис. 42, *б*), то за один оборот активные участки рамки пройдут дважды под северным полюсом и дважды под южным. Таким образом, за один оборот рамки индуктируемая э. д. с. совершит два периода колебаний. Чтобы получить 50 *гц*, необходима скорость 25 *об/сек*, или $25\cdot 60=1500$ *об/мин*. Частота f переменного тока может быть определена так:

$$f=\frac{np}{60}\ гц,$$

где n — число оборотов в минуту;

p — число пар полюсов.

Если нужно получить частоту $f=50$ *гц*, то обороты ротора в минуту составят

$$n=\frac{60f}{p}=\frac{3000}{p}\ об/мин.$$

Если число пар полюсов $p=1$, то числа оборотов ротора $n=3000$ *об/мин*. При $p=2$ $n=1500$ *об/мин*; при $p=3$ $n=1000$ *об/мин*; при $p=4$ $n=750$ *об/мин* и т. д.

§ 3. Действующее значение переменного синусоидального тока

Если в цепь переменного тока включить прибор, который предназначен для измерения с р е д н е й величины силы тока в цепи, то этот прибор покажет величину, равную нулю. Действительно, в каждый период ток протекает полпериода в одном направлении и полпериода — в другом. В цепи такого тока не будет происходить электролиза, то есть осаждения металла на катоде в электролитической ванне.

В то же время в сопротивлении, включенном в цепь переменного тока, идет непрерывный процесс выделения тепла, независимо от направления тока: и в первый и во второй полупериоды. Поэтому, чтобы судить о силе переменного синусоидального тока, его сравнивают с постоянным током по одинаковому тепловому действию. Полученное путем такого сравнения значение силы переменного тока называют действующим.

Таким образом, д е й с т в у ю щ е е (эффективное) значение силы переменного тока численно равно эквивалентной по тепловому действию силе п о с т о я н н о г о тока, то есть такой силе тока, которая за то же время, на том же сопротивлении выделит такое же количество тепла, что и п е р е м е н н ы й ток одинаковой силы.

В цепи постоянного тока в сопротивлении R за время T при силе тока I выделяется количество тепла

$$Q_{-}=I^2RT. \qquad (87)$$

В подобном сопротивлении, включенном в цепь переменного тока, в каждый очень короткий отрезок времени Δt, в течение которого мгновенную величину силы тока i можно считать практически неизменной, выделяется элементарное количество тепла

$$\Delta Q_{\sim}=i^2R\Delta t.$$

То есть количество выделяемого тепла пропорционально величине i^2R.

На рисунке 43 построены кривые i и i^2 для синусоидального переменного тока. Как видно из графика, несмотря на то, что ток i в течение периода меняется по величине и направлению, значение i^2 меняется только по величине и остается положительным независимо от направления тока i, то есть в первом полупериоде эта величина имеет положительное значение: $(+i)\cdot(+i)=i^2$, во втором полупериоде она также остается положительной: $(-i)\cdot(-i)=+i^2$.

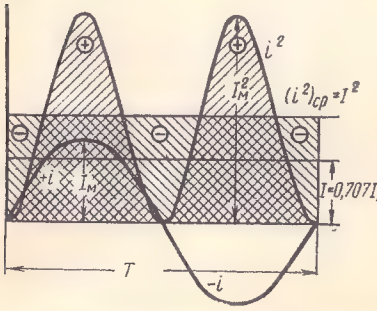


Рис. 43. Кривые мгновенных значений тока i и квадрата силы тока i^2. I — действующее или среднеквадратичное за период значение переменного тока.

Разделив площадь, ограниченную кривой i^2 и осью ωt, на время T, получим среднюю ординату кривой i^2 за период, которую обозначим $(i^2)_{ср}$. Тогда количество тепла, которое выделится в сопротивлении в цепи переменного тока за время T, можно найти так:

$$Q_{\sim}=(i^2)_{ср}RT. \qquad (88)$$

Согласно приведенному выше определению действующего значения переменного тока, $Q_{-}=Q_{\sim}$, то есть из (87) и (88) следует, что

$$I^2RT=(i^2)_{ср}RT,$$

откуда действующее значение переменного тока

$$I=\sqrt{(i^2)_{ср}}.$$

Действующее значение переменного тока есть среднеквадратичное за период значение переменного тока.

Величину i^2, графически представленную на рисунке 43, можно определить аналитически через амплитудное значение I_m^2:

$$i^2=I_m^2\sin^2\omega t=I_m^2\frac{1-\cos 2\omega t}{2}=\frac{I_m^2}{2}-\frac{I_m^2}{2}\cos 2\omega t,$$

где

$$\sin^2\omega t=\frac{1-\cos 2\omega t}{2}.$$

Среднее значение $\cos 2\omega t$ за период T равно нулю (соответствует сумме площадей, помеченных на рисунке 43 знаками + и —). Тогда среднее за период значение квадрата силы синусоидального переменного тока

$$(i^2)_{ср} = \frac{I_m^2}{2},$$

а действующее значение синусоидального переменного тока

$$I = \sqrt{(i^2)_{ср}} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{1{,}414} = 0{,}707 I_m.$$

Действующее значение переменного синусоидального напряжения может быть найдено из предыдущего

$$IR = \frac{I_m}{\sqrt{2}} R, \text{ или}$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 U_m,$$

то есть если в сети напряжение $U = 220$ *в*, то его максимальное амплитудное значение

$$U_m = 220 \cdot 1{,}414 = 311 \text{ в}.$$

Максимальная амплитуда напряжения 380 *в* равна $380 \cdot 1{,}414 = 538$ *в*. Это обстоятельство, когда максимальная амплитуда значительно превышает действующее значение, дает преимущество переменному току при использовании люминесцентных или дуговых ламп, которые легче зажигаются на переменном токе.

§ 4. Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Активным сопротивлением в цепи переменного тока называют сопротивление, в котором происходит необратимый процесс превращения электрической энергии в какой-либо другой ее вид, например в тепловую, световую, механическую и т. д. Активным сопротивлением являются нагревательные элементы в нагревательных приборах, нить накала лампы, провода сети, катушки с бифилярной намоткой и т. п. Если в цепь переменного тока включено только активное сопротивление R

(рис. 44, *а*), то значение силы тока в каждый момент времени определяют по закону Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

то есть ток также имеет синусоидальный характер, причем кривые напряжения и тока идут согласованно, так как их фазы ωt равны: напряжение и ток совпадают по фазе. На рисунке 44,*б* представлены кривые мгновенных зна-

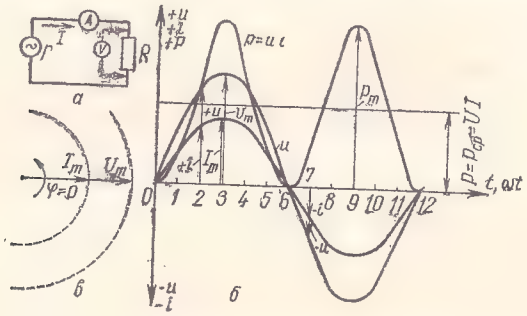


Рис. 44. Цепь с активным сопротивлением R: *а* — схема цепи; *б* — кривые мгновенных значений напряжения u, тока i и мощности p для цепи с активным сопротивлением; *в* — векторная диаграмма амплитудных значений силы тока I_m и напряжения U_m для начального момента времени.

чений u и i, на рисунке 44, *в* — векторная диаграмма для момента времени $t=0$. Угол сдвига между векторами напряжения и тока (φ) равен нулю. Для действующих значений напряжения и тока закон Ома может быть записан так:

$$I = \frac{U}{R};\ U = IR;\ R = \frac{U}{I}. \qquad (89)$$

Мгновенная мощность, которая выделяется на активном сопротивлении (например, в виде тепла), в любой момент времени равна произведению мгновенного значения напряжения на мгновенное значение тока:

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

Эта величина не синусоидальная. Так как $\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos^2 \omega t}{2}$,

мгновенная мощность может быть представлена так:

$$p = \frac{U_m I_m}{2} - \frac{U_m I_m}{2} \cos 2\omega t = \frac{U_m I_m}{\sqrt{2}\sqrt{2}} - \frac{U_m I_m}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos 2\omega t =$$
$$= UI - UI \cos 2\omega t,$$

то есть мгновенная мощность в любой момент времени равна сумме двух величин: постоянной мощности UI, равной произведению действующих значений напряжения и тока, и переменной мощности $UI\cos 2\omega t$. Эта переменная слагающая, как и всякая гармоническая функция, имеет среднее значение за период, равное нулю. Тогда средняя за период общая мощность равна постоянной слагающей мгновенной мощности:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}, \qquad (90)$$

где U и I — действующие значения напряжения и тока.

Кривую мгновенных значений мощности p можно получить графически (рис. 44, *б*). Для этой цели необходимо определить ряд мгновенных значений мощности (например, для точек *0*, *1*, *2* ... *12*). Их подсчитывают как произведения мгновенных значений напряжения и тока для указанных точек.

Далее, отложив на графике полученные значения мощности, нужно построить по ним кривую мгновенных значений мощности с учетом полученного знака и принятого для мощности масштаба. Расчет сводят в таблицу.

	Точки					
	1 и *5*	*2* и *4*	*3*	*7* и *11*	*8* и *10*	*0*, *6* и *12*
Значения u (*мм*)	+7	+13	+15	—7	—13	0
Значения i (*мм*)	+4	+8	+9	—4	—8	0
Значения p, как $p = u\,i$	+28	+104	+135	+28	+104	0

Как видно из таблицы, для любой точки значение мгновенной мощности имеет знак плюс. При построении развернутой диаграммы по полученным точкам, приведенным в таблице, выбран масштаб мощности, в 7 раз больший, чем для u и i. Средняя мощность P за период может

быть получена из графика как половина амплитуды P_m:

$$P = \frac{P_m}{2}, \text{ или } P = \frac{U_m I_m}{2} = UI;$$

значит, получено то же, что и по методу математических преобразований.

Величина активного сопротивления того или иного прибора при переменном токе может быть значительно больше сопротивления того же прибора постоянному току. Это связано с так называемым поверхностным эффектом, который заключается в том, что переменный ток неравномерно распределяется по сечению проводника. Плотность тока в поверхностных слоях всегда выше, чем во внутренних. Чем больше частота, тем сильнее сказывается поверхностный эффект. Причина этого заключается в том, что при переменном токе меняющееся магнитное поле индуктирует противодействующую току э. д. с. самоиндукции во внутренних слоях проводника, значительно бóльшую, чем во внешних слоях.

В медных и алюминиевых проводах поверхностный эффект при частоте 50 *гц* практически ощутим лишь при сечениях проводов свыше 25 *мм*^{2}.

Когда необходимо подчеркнуть, что указанная величина сопротивления прибора соответствует постоянному току, то это сопротивление называют омическим, в отличие от активного сопротивления переменному току.

§ 5. Цепь переменного тока с индуктивностью

Если в цепь переменного тока включена индуктивность, то в момент времени, когда возрастает мгновенное значение силы тока, протекающего от источника, энергия источника расходуется на образование магнитного поля в индуктивности без превращения ее в тепловую или механическую. В момент времени, когда убывает мгновенное значение силы тока, магнитное поле рассеивается, и запасенная в нем энергия отдается обратно в источник.

Покажем это аналитически и графически. Пусть к источнику переменного тока подключена катушка с индуктивностью L (рис. 45,*а*). Примем, что ее активное сопротивление R равно нулю. В катушке будет протекать переменный синусоидальный ток

$$i = I_m \sin \omega t.$$

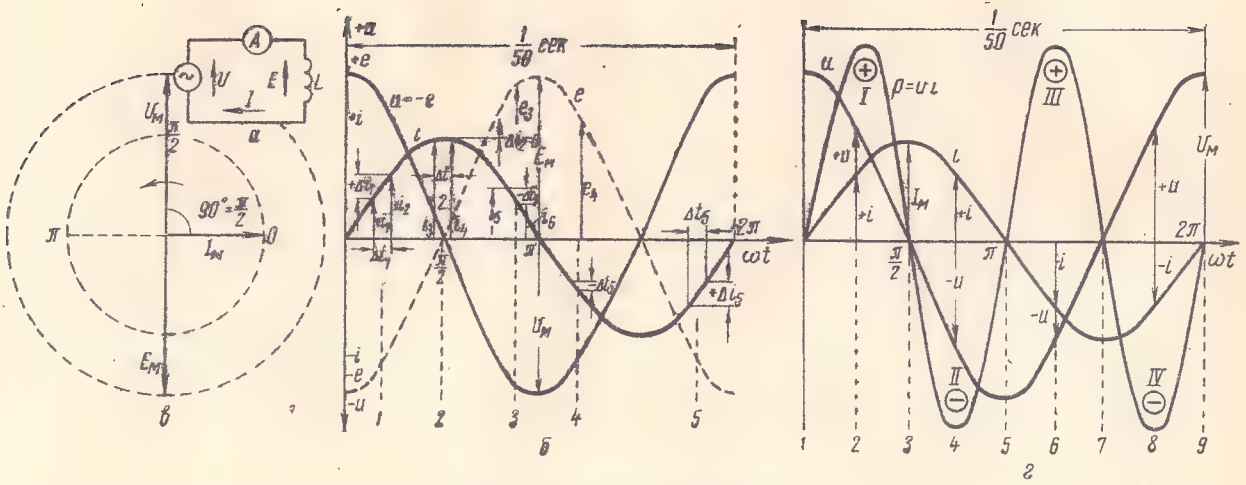


Рис. 45. Цепь с индуктивностью L:

а — схема включения; *б* — кривые мгновенных значений тока i, э. д. с. самоиндукции e и напряжения u; *в*—векторная диаграмма тока $I_м$ и напряжения $U_м$ для цепи с индуктивностью, для начального момента времени; *г* — построение кривой мгновенных значений мощности p по кривым тока i и напряжения u.

Этот ток сопровождается переменным синусоидальным магнитным потоком, совпадающим с ним по фазе.

Переменный магнитный поток, образующийся в катушке, индуктирует э.д.с. самоиндукции e_L, пропорциональную скорости изменения потока, аналогично формуле (81):

$$e_L = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}, \qquad (91)$$

где e_L — э.д.с. (*в*);

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ — скорость изменения тока (*а/сек*);

L — индуктивность катушки (*гн*).

Знак минус отражает правило Ленца, которое в данном случае означает, что если мгновенное значение тока увеличивается (то есть его приращение за время Δt имеет положительный знак: $+\Delta i$ — точки *1* и *5* на рисунке 45,*б*), то мгновенное значение э.д.с. будет иметь отрицательный знак: $-L\frac{+\Delta i}{\Delta t} = -e_L$. Если же мгновенное значение тока уменьшается (то есть его приращение за время Δt имеет отрицательный знак: $-\Delta i$ — точки *3* и *4* на рисунке 45,*б*), то э.д.с. имеет положительный знак: $-L\left(\frac{-\Delta i}{\Delta t}\right) = +e_L$. Таким образом, исходя из этих соображений можно построить кривую мгновенных значений э.д.с. самоиндукции на основании имеющейся развернутой диаграммы тока. Как показано на рисунке 45,*б*, в момент времени, соответствующий точке *1* на рисунке 45,*б*, приращение тока положительное: $+i_2 - (+i_1) = +\Delta i_1$. В момент времени *5* это приращение также положительное: $+\Delta i_5$. Следовательно, мгновенные значения э.д.с. в эти моменты отрицательные: $-e_1$ и $-e_5$. В момент времени *2* приращение тока равно нулю: $\Delta i_2 = i_4 - i_3 = 0$, поэтому и э.д.с. e_2 равна нулю, то есть в этот момент график э.д.с. проходит через нуль и меняет свой знак с минуса на плюс. В моменты времени, соответствующие точкам *3* и *4*, приращение токов Δi_3 и Δi_4 имеет отрицательный знак (например, для точки *3* $i_6 - i_5 = -\Delta i_3$). В эти моменты времени знак э.д.с. положительный $+e_3$ и e_4. Применяя второе правило Кирхгофа для цепи, изображенной на рисунке 45, *а*, и принимая во внимание, что в этой цепи действует напряжение источника u и э.д.с. самоиндукции e_L, можно написать:

$$u + e_L = 0 \text{ или } e_L = -u, \qquad (92)$$

то есть развернутая диаграмма напряжения будет зеркальным изображением развернутой диаграммы э.д.с., так как только в этом случае в каждый момент времени сумма значений э.д.с. и напряжения равна нулю.

Теперь по развернутой диаграмме напряжения и тока можно построить векторную диаграмму их максимальных значений, например для начального момента времени (рис. 45, *в*). Из векторной диаграммы видно, что в цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения на угол $\varphi = 90° = \frac{\pi}{2}$ *рад*. В соответствии с графиком, то есть если ток определяется равенством

$i = I_m \sin \omega t$, напряжение $u = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$.

Это можно показать и аналитически. А именно из формул (91) и (92)

$$u = -e = L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Чтобы перейти к действующим значениям U и I, в этой формуле необходимо раскрыть значение $\frac{\Delta i}{\Delta t}$. Это можно сделать с привлечением аппарата тригонометрии.

Если в момент времени t мгновенное значение силы тока $i = I_m \sin \omega t$, то для момента времени $t + \Delta t$ (Δt — весьма малый, близкий к нулю, отрезок времени) ток изменится на весьма малую величину Δi и будет

$$i + \Delta i = I_m \sin \omega (t + \Delta t).$$

Преобразуя это равенство относительно Δi, получим:

$$\Delta i = I_m \sin(\omega t + \omega \Delta t) - i = I_m \sin(\omega t + \omega \Delta t) - I_m \sin \omega t = I_m [\sin(\omega t + \omega \Delta t) - \sin \omega t] = I_m (\sin \omega t \cdot \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \cdot \sin \omega \Delta t - \sin \omega t).$$

В этом выражении угол $\omega \Delta t$ имеет очень малое значение, так как Δt по условию весьма малая величина. Тогда $\cos \omega \Delta t \approx \cos 0 = 1$, а $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$. Подставляя эти значения в (93), получим:

$$\Delta i = I_m (\sin \omega t \cdot 1 + \cos \omega t \cdot \omega \Delta t - \sin \omega t) = I_m \omega \Delta t \cos \omega t, \quad (93)$$

откуда

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = I_m \omega \cos \omega t = I_m \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Напряжение на индуктивности

$$u = L\frac{\Delta i}{\Delta t} = I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (94)$$

Из формулы (94) следует, что максимальное значение напряжения на индуктивности

$$U_m = I_m \omega L.$$

Поделив обе части этого равенства на $\sqrt{2}$, перейдем к действующим значениям тока и напряжения в цепи с индуктивностью:

$$\frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \omega L,$$

то есть $U = I\omega L = IX_L$ или $I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{X_L}$, (95)

$$X_L = \frac{U}{I},$$

где X_L — индуктивное сопротивление. Его размерность

$$[X] = [\omega][L] = \frac{1}{сек} \cdot гн = \frac{1}{сек}\, ом \cdot сек = ом.$$

Индуктивное сопротивление в отличие от активного называется реактивным, в котором происходит обратимый процесс — колебания энергии от источника электрической энергии к катушке индуктивности и обратно. Равенства (95) выражают закон Ома для цепи с индуктивностью.

Мгновенная мощность в катушке в любой момент времени

$$p = ui = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) I_m \sin \omega t = U_m I_m \cos \omega t \sin \omega t,$$

а учитывая, что

$$2 \sin \omega t \cos \omega t = \sin 2\omega t, \text{ или } \cos \omega t \sin \omega t = \frac{\sin 2\omega t}{2},$$

получим:

$$p = \frac{U_m I_m}{2} \sin \omega t = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sin 2\omega t,$$

или

$$p = UI \sin 2\omega t,$$

то есть мгновенная мощность цепи с индуктивным сопротивлением изменяется с двойной частотой, в течение пе-

риода два раза достигая положительного максимума (рис. 45, *г*, моменты времени *2* и *6*) и два раза отрицательного максимума при той же абсолютной величине (моменты времени *4* и *8*). В течение *I* и *III* полупериодов индуктивность потребляет от генератора мощность на образование магнитного поля. В течение *II* и *IV* полупериодов мощность имеет отрицательный знак. В эти полупериоды ток в цепи уменьшается до нуля, и запасенная в магнитном поле индуктивной катушки энергия возвращается обратно в источник.

Положительное мгновенное значение мощности p в полупериод *I* получается благодаря тому, что знак тока $(+i)$ и знак напряжения $(+u)$ в этот момент — положительные (обе кривые лежат выше оси ωt). Для полупериода *II* знак тока положительный $(+i)$, а знак напряжения отрицательный $(-u)$, поэтому мощность имеет отрицательный знак. Для полупериода *III* ток и напряжение имеют знак минус $(-i, -u)$ и т. д.

Кривую мгновенных значений мощности можно было бы получить также графическим путем. При этом нужно найти мгновенные значения мощности для ряда точек (*1*, *2* ... *9*) — произведения мгновенных значений u и i, как это было проведено для цепи с активным сопротивлением.

Среднее значение мощности за период в соответствии с рисунком 45, *г* равно нулю, так как при сложении всех положительных и отрицательных значений мгновенной мощности p, изменяющейся по синусоиде, получается сумма, равная нулю. Другими словами, в цепи с индуктивностью происходит периодический обмен энергией между генератором и магнитным полем цепи без превращения электрической энергии в тепловую или механическую. Энергия магнитного поля в джоулях, запасаемая за четверть периода,

$$W_m = \frac{LI_m^2}{2},$$

где L — индуктивность катушки (*гн*);

I_m — максимальная величина тока (*а*).

В моменты полупериодов *II* и *IV* катушка отдает запасенную в магнитном поле энергию обратно к источнику.

Мера обмена энергией между источником и индуктивной катушкой — это максимальное значение мгновенной мощности, называемое реактивной мощностью,

$$Q_L = UI = I^2 X_L = \omega L I^2, \qquad (96)$$

где U — действующее значение напряжения, определяемое по показанию вольтметра (*в*);

I — действующее значение реактивного тока (*а*);

ω — угловая частота (*рад/сек*);

L — коэффициент индуктивности катушки (*гн*).

Реактивную мощность в отличие от активной измеряют в вольт-амперах, называемых реактивными вольт-амперами: 1 вольт-ампер реактивный (1 *вар*)=1 вольт·1 ампер.

§ 6. Цепь переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью

Реальная катушка индуктивности обычно имеет активное сопротивление, которым нельзя пренебречь. На рисунке 46,*а* показана цепь катушки, индуктивность которой L, а активное сопротивление R. На рисунке 46,*б* представлены кривые мгновенных значений напряжения u и тока i в цепи с R и L, а на рисунке 46,*в* — взаимное рас-

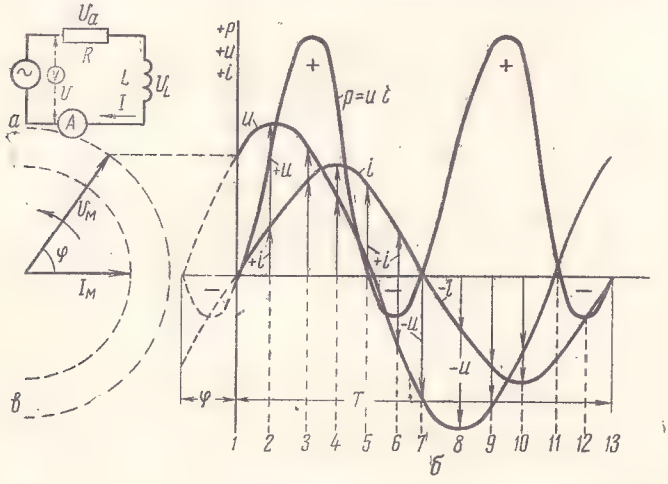


Рис. 46. Цепь с активным сопротивлением R и индуктивностью L:

а — схема включения; *б* — кривые мгновенных значений напряжения u, тока i и мощности p для цепи с активным сопротивлением и индуктивностью; *в* — векторная диаграмма амплитудных значений тока и напряжения для начального момента времени.

положение векторов напряжения U_m и тока I_m, сдвинутых относительно друг друга на угол φ.

Если в цепи с R и L проходит синусоидальный ток $i=I_m \sin \omega t$, то мгновенное значение активной составляющей напряжения может быть определено как $u_a=Ri=RI_m \sin \omega t$. Мгновенное значение напряжения на индуктивном сопротивлении в соответствии с (94)

$$u_L = X_L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Мгновенное же значение напряжения, приложенного ко всей цепи, равно алгебраической сумме мгновенных значений напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях:

$$u = u_a + u_L = RI_m \sin \omega t + X_L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Так как оба слагаемых этой суммы — синусоидальные величины, изменяющиеся с одинаковой частотой ω, то результирующее напряжение u — тоже синусоидально и имеет ту же частоту.

Это результирующее напряжение u представлено на рисунке 46,*б*.

Анализ схем с несколькими сопротивлениями в цепи удобно проводить на векторных диаграммах действующих значений величин, которые могут быть измерены приборами, например вольтметром и амперметром (рис. 46,*а*). Для перехода к диаграмме амплитудных величин каждый вектор действующего значения следует увеличить в $\sqrt{2}$ раз, так как $\dot{U}_m=\sqrt{2}\dot{U}$, а $\dot{I}_m=\sqrt{2}\dot{I}$.

Методика построения векторной диаграммы для схемы 46,*а* следующая. Общим для обоих сопротивлений R и X_L в этой схеме является ток, действующее значение которого измеряют амперметром A. Откладываем этот ток в определенном, удобном для нас, масштабе (рис. 47,*а*) по горизонтали, так как начальная фаза тока $i=I_m \sin\omega t$ равна нулю (рис. 46,*б*). Напряжение U совпадает по фазе с током, поскольку оно приложено к участку цепи, имеющему только активное сопротивление R. Поэтому вектор $\dot{U}$ откладываем вдоль вектора тока $\dot{I}$. Масштаб напряжения также выбираем удобным для построения. Например, если для тока мы приняли масштаб 1 : 1, то есть 1 ампер отложили в 1 *см* длины вектора $\dot{I}$, то для

напряжения удобнее принять масштаб 100 : 1, то есть 100 вольт отложить в 1 *см*. Напряжение U_L опережает ток I по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$, так как оно приложено к участку цепи, имеющему только индуктивное сопротивление. Поэтому вектор $\dot{U}_L$ отложим в направлении, перпендикулярном вектору $\dot{I}$. Причем масштаб вектора $\dot{U}_L$ должен быть равен масштабу $\dot{U}_a$. Складывая затем геометрически $\dot{U}_a$ и $\dot{U}_L$, получим вектор действующего значения общего напряжения $\dot{U}$, приложенного к цепи с R и X_L.

На векторной диаграмме (рис. 47,*а*) векторы $\dot{U}_a$, $\dot{U}_L$ и $\dot{U}$ образуют прямоугольный треугольник, который

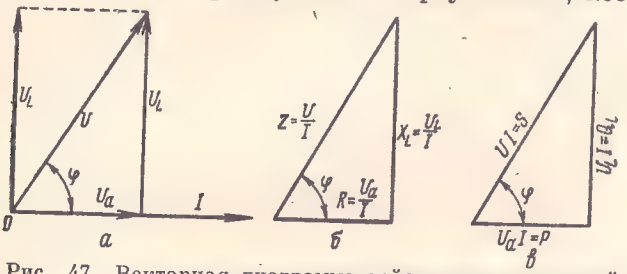


Рис. 47. Векторная диаграмма действующих значений тока I и напряжения U общего для схемы и его активной U_a и индуктивной U_L составляющих (*а*) и треугольники сопротивления (*б*) и мощностей (*в*):
Z — полное сопротивление цепи; R — активное сопротивление; X_L — индуктивное сопротивление; S — полная мощность (*ва*); P — активная мощность (*вт*); Q_L — реактивная индуктивная мощность (*вар*).

называется треугольником напряжений. По теореме Пифагора, для этого треугольника

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \qquad (97)$$

Если все стороны треугольника напряжений разделить на величину I, то получится так называемый треугольник сопротивлений (рис. 47,*б*). Из этого треугольника

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \qquad (98)$$

Здесь Z — полное сопротивление всей цепи (*ом*).

Если известно напряжение U, приложенное к исследуемой цепи (оно может быть измерено вольтметром V в цепи на рисунке 46,*а*), а также ток в цепи I (он изме-

ряется в этой цепи амперметром A), то полное сопротивление всей цепи Z в омах

$$Z=\frac{U}{I},$$

отсюда

$$I=\frac{U}{Z}=\frac{U}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}. \qquad (99)$$

Формула (99) является математическим выражением закона Ома для цепи с индуктивным и активным сопротивлениями, соединенными последовательно.

Пользуясь векторными диаграммами, можно написать следующие соотношения между составляющими напряжения и найти величину угла φ. Так, из рисунка 47,*а*

$$\cos\varphi=\frac{U_a}{U};\ U_a=U\cos\varphi;\ U_L=U\sin\varphi. \qquad (100)$$

Из треугольника сопротивлений

$$\cos\varphi=\frac{R}{Z};\ R=Z\cos\varphi;\ X_L=Z\sin\varphi. \qquad (101)$$

В цепи с параллельным включением активного и индуктивного сопротивлений аналогично уравнению (100)

$$\cos\varphi=\frac{I_a}{I};\ I_a=I\cos\varphi;\ I_L=I\sin\varphi. \qquad (102)$$

Пример 1. Определить кажущееся сопротивление, если активное сопротивление $R=50$ *ом*, а индуктивность катушки, включенной последовательно с активным сопротивлением, равна 0,5 *гн*. Определить величину тока и угол сдвига фаз между напряжением сети и током в цепи. Частота тока $f=50$ *гц*.

Индуктивное сопротивление

$$X_L=\omega L=2\pi fL=2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 0,5=157\ ом.$$

Полное сопротивление

$$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{2500+24\,649}=165\ ом.$$

При напряжении сети $U=220$ *в* ток

$$I=\frac{U}{Z}=\frac{220}{165}=1,34\ а;$$

$$\cos\varphi=\frac{R}{Z}=\frac{50}{165}=0,3;\ \sin\varphi=\sqrt{1-0,3^2}=0,955;\ \varphi\approx 73°.$$

Кривую мгновенных значений мощности, которую потребляет цепь с активным и индуктивным сопротивлениями, можно получить способом, изложенным при рассмотрении цепи с активным сопротивлением. С этой целью для ряда моментов времени (*1*, *2*, ... *13*) определяют мгновенные значения тока i и напряжения u (по кривой рисунка 46,*б*), а затем, умножив их, находят мгновенные значения мощности p. Расчет сводят в таблицу.

	Точки					
	1	2	3	4	5	6
Значения u (*мм*)	+16	+20	+17	+10	0	—10
Значения i (*мм*)	0	+7	+12	+15	+12	+6
Значения мощности $p = ui$	0	+140	+204	+150	0	—60

Продолжение

	Точки					
	7	8	9	10	11	12
Значения u (*мм*)	—16	—20	—17	—10	0	+10
Значения i (*мм*)	0	—7	—12	—15	—12	—6
Значения мощности $p = ui$	0	+140	—204	+150	0	—60

По полученным точкам строят развернутую диаграмму мощности, приняв масштаб для ее построения, в 6 раз больший, чем для построения u.

Как видно из полученной диаграммы, мощность не является синусоидальной величиной. Значению энергии за период времени T соответствует площадь, заключенная между кривой мощности и осью времени. В отрезки времени *5—7* и *11—13* энергия имеет отрицательное значение и соответствует энергии, которая возвращается из магнитного поля катушки в сеть (к генератору). Энергия, соответствующая площади, ограниченной кривой и расположенной выше оси времени, соответствует той энергии, которая поступает из генератора в цепь. Разность энергий со знаком плюс и минус равняется активной энергии, необратимо расходуемой на активном сопротивлении цепи.

Мгновенное значение мощности в цепи с активным и индуктивным сопротивлениями можно также определить аналитически:

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + \varphi)\, I_m \sin \omega t =$$
$$= U_m I_m (\sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi) \sin \omega t =$$
$$= \sqrt{2}U \sqrt{2}I (\sin^2 \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi \sin \omega t) =$$
$$= 2UI \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \cos \varphi + \frac{\sin 2\omega t}{2} \sin \varphi \right) =$$
$$= UI [\cos \varphi - (\cos 2\omega t \cos \varphi - \sin 2\omega t \sin \varphi)] =$$
$$= UI [\cos \varphi - \cos (2\omega t + \varphi)] = UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t + \varphi).$$

Второй член полученного результата представляет собой периодическую кривую, изменяющуюся с двойной частотой по сравнению с частотой тока и напряжения. Как было показано выше (§ 3), при таком характере кривой ее среднее значение за период равно нулю.

Поэтому, переходя к средним значениям в правой и левой частях этого равенства, получим с р е д н ю ю мощность цепи, которая называется ее а к т и в н о й мощностью:

$$P = UI\cos\varphi. \tag{103}$$

Характер мощностей и соотношение между ними в схеме с активным и индуктивным сопротивлениями можно установить, если все стороны треугольника напряжений умножить на действующее значение тока I. При этом получится т р е у г о л ь н и к м о щ н о с т е й (рис. 47,*в*). Из этого треугольника активная мощность

$$P_a = U_a I = UI\cos\varphi = S\cos\varphi,$$

то есть получилось то же, что и при аналитическом определении.

Активную мощность измеряют в ваттах или киловаттах.

Реактивная мощность

$$Q_L = U_L I = UI\sin\varphi = S\sin\varphi. \tag{104}$$

Ее измеряют, как говорилось выше, в в о л ь т - а м п е р а х р е а к т и в н ы х (*вар*) или к и л о в о л ь т - а м п е р а х р е а к т и в н ы х (*квар*).

Полная мощность

$$S = UI = \sqrt{U^2 I^2} = \sqrt{(IU_a)^2 + (IU_L)^2} = \sqrt{P^2 + Q_L^2}. \tag{105}$$

Ее измеряют в в о л ь т-а м п е р а х (*ва*) или к и л о в о л ь т - а м п е р а х (*ква*).

Косинус фи (cos φ) в цепи с индуктивностью в практике часто называют о т с т а ю щ и м или положительным. На активном сопротивлении выделяется активная мощность $P = U_a I = I^2 R$, а индуктивное сопротивление определяет величину реактивной мощности, как

$$Q_L = U_L I = I^2 \omega L. \tag{106}$$

В практике активную мощность измеряют ваттметром, а полную мощность подсчитывают как произведение пока-

заний вольтметра и амперметра. Зная эти две величины, можно рассчитать реактивную мощность.

Величину cos φ называют также коэффициентом мощности. Практически в электроустановках cos φ определяют, пользуясь показаниями ваттметра (или счетчика с пересчетом киловатт-часов в киловатты), вольтметра и амперметра, или измеряют фазометром. Отношение показаний ваттметра к произведению показаний вольтметра на показания амперметра определяет cos φ:

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{P}{S}. \qquad (107)$$

Пример 2. Однофазный электрический двигатель потребляет из сети 220 *в* ток 30 *а*, cos φ=0,85. Коэффициент полезного действия двигателя η=0,8. Определить: 1) потребляемую из сети активную мощность P; 2) мощность, отдаваемую двигателем со шкива (полезную мощность), $P_{эф}$; 3) потребляемую из сети реактивную мощность Q_L; 4) полную мощность S.

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P = UI\cos\varphi = 220 \cdot 30 \cdot 0{,}85 = 5600\ вт = 5{,}6\ квт.$$

Полезная мощность, отдаваемая двигателем со шкива,

$$P_{эф} = P\eta = 5{,}6 \cdot 0{,}84 = 4{,}48\ квт.$$

Реактивная мощность

$$Q_L = UI\sin\varphi = UI\sqrt{1-\cos^2\varphi} = 220 \cdot 30 \cdot 0{,}52 = 3430\ вар = 3{,}4\ квар.$$

Полная мощность

$$S = UI = 220 \cdot 30 = 6600\ ва = 6{,}6\ ква,$$

или

$$S = \sqrt{P^2+Q^2} = \sqrt{5{,}6^2+3{,}4^2} = 6{,}6\ ква.$$

Пример 3. Ваттметр показывает 1500 *вт*, вольтметр 380 *в*, амперметр 50 *а*. Определить cos φ, реактивную мощность, активный и реактивные токи.

1. $\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{1500}{380 \cdot 50} = 0{,}79.$

2. $\sin\varphi = \sqrt{1-\cos^2\varphi} = \sqrt{1-0{,}625} = 0{,}61.$

3. $Q_L = UI\sin\varphi = 380 \cdot 50 \cdot 0{,}61 = 1160\ вар.$

4. Активный ток

$$I_a = I\cos\varphi = 50 \cdot 0{,}79 = 39{,}5\ а.$$

5. Реактивный ток

$$I_L = I\sin\varphi = 30{,}5\ а.$$

§ 7. Цепь переменного тока с емкостью (рис.48)

С изменением напряжения на обкладках конденсатора меняется его заряд. Приращение заряда Δq, который поступает в конденсатор за очень малый промежуток времени Δt, равно произведению тока i в данный момент времени на единицу времени Δt:

$$\Delta q = i\,\Delta t. \qquad (108)$$

Но, как рассматривалось выше,

$$q = Cu, \qquad (109)$$

где q — электрический заряд конденсатора ($к$);
C — емкость конденсатора ($Ф$);
u — напряжение на обкладках конденсатора ($в$).

Из (109) приращение заряда Δq в кулонах при увеличении напряжения на обкладках конденсатора на Δu

$$\Delta q = C\,\Delta u. \qquad (110)$$

Согласно формулам (108) и (110),

$$i\,\Delta t = C\,\Delta u,$$

или

$$i = C\frac{\Delta u}{\Delta t}, \qquad (111)$$

то есть переменный ток в цепи с емкостью пропорционален скорости изменения приложенного к конденсатору напряжения.

Пользуясь формулой (111) и учитывая, что цепь включена на синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, можно построить кривую мгновенных значений тока (рис. 48,*б*). В первую четверть периода приращение напряжения имеет положительный знак. Например, для момента времени 1 : $u_2 - u_1 = +\Delta u_1$. В соответствии с формулой (111) мгновенное значение тока в этот момент времени также имеет положительный знак. В момент времени *2*, когда кривая напряжения проходит через свой максимум, приращение напряжения за отрезок времени Δt равно $\Delta u_2 = 0$. Ток в этот момент времени также равен нулю: $i = C\frac{0}{\Delta t} = 0$, то есть кривая тока в момент времени *2* проходит через нуль. Конденсатор в этот момент имеет максимальный заряд. В момент времени *3* приращение напряжения имеет отри-

цательный знак, так как оно нарастает в отрицательном направлении: $u_6 - u_5 = -\Delta u_3$. Ток для этого момента времени также имеет отрицательное значение:

$$i = C\frac{-\Delta u}{\Delta t} = -i_3 \text{ и т. д.}$$

Для любого момента времени напряжение и ток могут быть подсчитаны как

$$u = U_m \sin \omega t, \text{ а } i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (112)$$

Чтобы получить соотношения между действующими значениями тока и напряжения в цепи с емкостью, в формуле (111) необходимо раскрыть значение $\frac{\Delta u}{\Delta t}$.

Пусть в момент времени t мгновенное значение напряжения, как в (112), $u = U_m \sin \omega t$, тогда для момента времени $t + \Delta t$, где Δt — весьма малая величина, мгновенное напряжение

$$u + \Delta u = U_m \sin(\omega t + \Delta t).$$

Отсюда можно найти выражение для Δu:

$$\Delta u = U_m \sin(\omega t + \omega \Delta t) - u = U_m [\sin(\omega t + \omega \Delta t) - \sin \omega t] =$$
$$= U_m (\sin \omega t \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \sin \omega \Delta t - \sin \omega t).$$

Поскольку $\cos \omega \Delta t \approx \cos 0 = 1$ и $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$,

$$\Delta u = U_m (\sin \omega t + \cos \omega t\, \omega \Delta t - \sin \omega t) = U_m \omega \Delta t \cos \omega t,$$

откуда

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = U_m \omega \cos \omega t. \qquad (113)$$

Подставляя в формулу (111) вместо $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ его значение из (113), получим:

$$i = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \qquad (114)$$

то есть ток в цепи с емкостью опережает напряжение на 90°, или $\frac{\pi}{2}$ радиан. Векторная диаграмма для начального момента времени представлена на рисунке 48,*в*.

Теперь проследим процесс зарядки и разрядки конденсатора. Если в первую четверть периода конденсатор заряжается, то во вторую четверть периода, когда напряжение уменьшается от максимального значения до нуля,

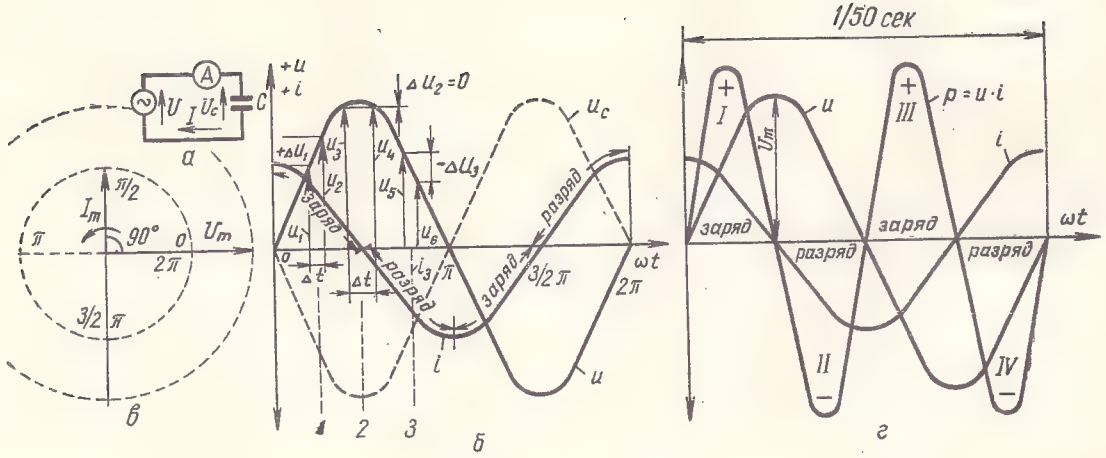


Рис. 48. Цепь с емкостью C:

$а$ — схема включения; $б$ — кривые мгновенных значений напряжения u и тока i; Δu — приращение напряжения на обкладках конденсатора за отрезок времени Δt; $в$ — векторная диаграмма для начального момента времени; $г$ — построение кривой мгновенных значений мощности p по кривым тока i и напряжения u.

конденсатор разряжается и посылает ток навстречу приложенному напряжению. Когда напряжение проходит через нуль, ток в цепи достигает своего максимального значения. Конденсатор в этот момент полностью разряжается. С момента перехода напряжения через нуль начинается новая зарядка конденсатора, ток имеет одинаковое с напряжением направление, то есть он остается отрицательным по знаку. С увеличением напряжения на обкладках конденсатора ток снижается. В момент, когда напряжение, достигнув своего максимального отрицательного значения, начинает убывать, конденсатор, полностью зарядившись, разряжается.

Из формул (112) для i и (114) имеем:

$$I_m = U_m \omega C.$$

Поделим обе части равенства на $\sqrt{2}$:

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \omega C,$$

то есть

$$I = U\omega C = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{X_C} \text{ или } U = IX_C = \frac{I}{\omega C}, \qquad (115)$$

где I — действующее значение тока (*а*);
U — действующее значение напряжения (*в*);
C — емкость конденсатора (*ф*);
ω — угловая частота тока (*рад/сек*);

$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ — реактивное емкостное сопротивление конденсатора, обратно пропорциональное частоте напряжения, приложенного к конденсатору, и емкости конденсатора, то есть чем больше частота и чем больше емкость конденсатора, тем меньше величина емкостного сопротивления. Размерность X_C

$$[X_C] = \left[\frac{1}{\omega C}\right] = \frac{1}{\frac{1}{сек} \cdot \frac{а \cdot сек}{в}} = \frac{в}{а} = ом.$$

Емкостное сопротивление носит реактивный характер: в моменты, когда мгновенное значение напряжения увеличивается, конденсатор запасает заряд (заряжается),

напряжение на его обкладках повышается. При уменьшении мгновенных значений напряжения конденсатор разряжается и отдает запасенный заряд обратно генератору.

Равенства (115) являются законом Ома для цепи с емкостью.

Пример 4. Определить силу тока в цепи с конденсатором $C=10$ *мкф* ($10\cdot10^{-6}$ *ф*), если частота переменного тока $f=50$ *гц*.

Емкостное сопротивление

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{314\cdot10\cdot10^{-6}}=318\ ом.$$

Если напряжение $U=220$ *в*, сила тока

$$I=\frac{220}{318}\approx 0{,}69\ a.$$

Мгновенная мощность в каждый момент времени

$$p=ui=U_m\sin\omega t I_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)=$$

$$=U_m\sin\omega t I_m\cos\omega t=\frac{U_m I_m}{2}\sin 2\omega t, \qquad (116)$$

то есть мгновенная мощность — синусоидальная величина, изменяющаяся с двойной частотой по сравнению с частотой тока (напряжения). Кривую мгновенных значений этой мощности можно построить графическим путем (аналогично тому, как показано для цепи с индуктивным сопротивлением. рис. 45, *г*). Рассматривая полученную развернутую диаграмму мощности, можно отметить следующее. Мгновенная мощность, как и в цепи с индуктивностью, колеблется с двойной частотой. В *I* и *III* полупериоды мгновенная мощность имеет положительный знак (а при индуктивности — отрицательный). Физический смысл этого явления заключается в том, что в эти полупериоды конденсатор заряжается — ток совпадает по направлению с напряжением (по знаку). В конденсаторе запасается энергия электрического поля

$$W_э=\frac{CU_m^2}{2}\ дж,$$

где C — емкость конденсатора (*ф*);

U_m — максимальное значение напряжения, приложенного к конденсатору (*в*).

Во *II* и *IV* полупериоды, когда напряжение уменьшается от максимального значения до нуля, конденсатор разряжается, отдавая запасенную энергию обратно генератору. Энергия, полученная цепью с конденсатором от генератора за период $T = {}^1/_{50}$ *сек*, равна нулю. Мощность, которая характеризует эту энергию, является р е а к т и в н о й. Величина ее

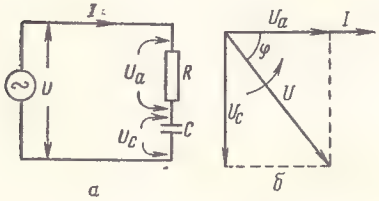
$$Q_C = UI = \omega C U^2. \qquad (117)$$

Ее измеряют также в вольт-амперах реактивных (*вар*).

Реактивная энергия как в цепи с индуктивностью, так и в цепи с емкостью циркулирует между источником тока и токоприемником, не выделяясь и не превращаясь в другие формы энергии на индуктивном или емкостном сопротивлении, но реактивный ток загружает линию и вызывает в ней потери на нагрев проводов.

§ 8. Цепь переменного тока с активным сопротивлением и емкостью (рис. 49)

Общий ток I (рис. 49, *б*) вызывает падение напряжения на активном сопротивлении U_a, совпадающее по фазе с током, и падение напряжение U_C на емкостном сопротивлении X_C. Напряжение U_C отстает от тока на 90°, или на $\frac{\pi}{2}$.



а *б*

Рис. 49. Цепь с активным сопротивлением R и емкостью C, включенными последовательно:
а — схема цепи; *б* — векторная диаграмма тока и напряжений.

По закону Кирхгофа, общее напряжение в цепи равно геометрической сумме напряжений на отдельных ее участках. Из векторной диаграммы (рис. 49, *б*) величина общего напряжения

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_C^2}. \qquad (118)$$

Выделив на векторной диаграмме треугольник напряжений U, U_a, U_C и разделив каждое из них на ток I, перейдем к т р е у г о л ь н и к у с о п р о т и в л е н и й для цепи с активным и емкостным сопротивлениями (рис. 50). Из этого треугольника можно определить полное сопротивление цепи Z:

$$Z=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \qquad (119)$$

По закону Ома, для рассматриваемой цепи

$$I=\frac{U}{Z}=\frac{U}{\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \qquad (120)$$

В цепи с активным и емкостным сопротивлениями ток опережает напряжение на угол φ. Этот угол может быть найден из выражения

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{U_C}{U_a}=\frac{X_C}{R};$$

$$\cos\varphi=\frac{U_a}{U}=\frac{R}{Z}. \qquad (121)$$

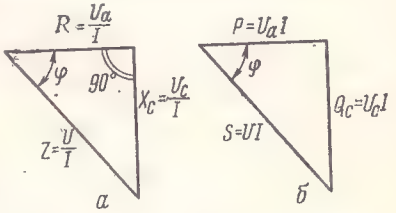


Рис. 50. Треугольники сопротивлений (*а*) и мощностей (*б*) для цепи с активным сопротивлением и емкостью.

Пример 5. Определить полное сопротивление цепи переменного тока частотой 50 *гц*, в которую включены последовательно емкость $C=20$ *мкф*, сопротивление $R=40$ *ом*. Определить ток в цепи, если напряжение $U=220$ *в*, а также угол сдвига фаз между током и напряжением. Емкостное сопротивление

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{10^6}{2\cdot 3{,}14\cdot 50\cdot 20}\approx 40 \text{ ом}.$$

Полное сопротивление

$$Z=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{40^2+40^2}\approx 56{,}6 \text{ ом}.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{X_C}{R}=\frac{40}{40}=1; \qquad \varphi=45°.$$

Если в цепи последовательно включены активное и емкостное сопротивления, то на емкостном сопротивлении падает напряжение $U_C=\frac{I}{\omega C}=IX_C$.

Вектор напряжения $\dot{U}_C$ отстает от вектора тока $\dot{I}$ на 90° (рис. 49, *б*). Между генератором и емкостью происходит обмен реактивной мощностью

$$Q_C=\frac{U_C^2}{X_C}=\omega CU_C^2. \qquad (122)$$

Соотношения между мощностями в рассматриваемой цепи можно выяснить, если построить треугольник мощностей (рис. 50, *б*).

Полная мощность S в цепи равна геометрической сумме активной и реактивной мощностей, а ее абсолютная величина определяется из треугольника мощностей:

$$S=\sqrt{P^2+Q_C^2}=\sqrt{(U_aI)^2+(U_CI)^2}=$$
$$=\sqrt{I^2(U_a^2+U_C^2)}=IU, \qquad (123)$$

где U — общее напряжение сети;

I — сила тока, потребляемого из сети.

Активная мощность в этом случае

$$P=S\cos\varphi=UI\cos\varphi. \qquad (124)$$

Косинус фи в цепи с емкостью в практике часто называют опережающим, или отрицательным.

§ 9. Цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

В такой цепи (рис. 51, *а*) протекает общий ток I, вызывающий падение напряжения на ее элементах.

Векторная диаграмма рассматриваемой цепи представлена на рисунке 51, *б*. Общее напряжение U равно геометрической сумме векторов U_a, U_L и U_C. Из векторной диаграммы абсолютная величина

$$U=\sqrt{U_a^2+(U_L-U_C)^2}. \qquad (125)$$

Из треугольника сопротивлений полное сопротивление цепи

$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \qquad (126)$$

Закон Ома для рассматриваемой цепи:

$$I=\frac{U}{Z}=\frac{U}{\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}};\quad \cos\varphi=\frac{R}{Z}. \qquad (127)$$

Соответствующим подбором L и C можно добиться такого результата, когда

$$X_L=X_C,\quad \text{или}\quad \omega L-\frac{1}{\omega C}=0,$$

то есть емкостное сопротивление будет равно индуктивному. Сила тока в цепи при этом будет максимальной, ограниченной только активным сопротивлением R:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Этот случай в электрической цепи с последовательным соединением сопротивлений называется электрическим резонансом в последовательной цепи, или резонансом напряжений.

Резонанс напряжений в электросистемах иногда возникает непредвиденно и приводит к тому, что на отдель-

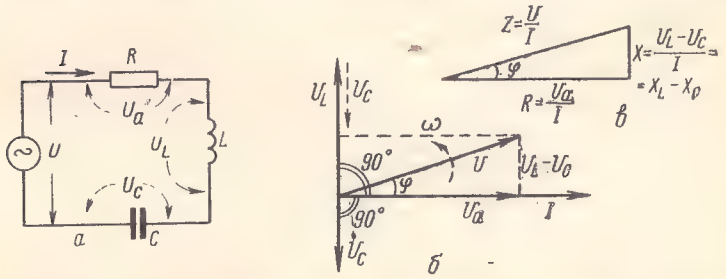


Рис. 51. Цепь с последовательным включением активного сопротивления R, индуктивности L и емкости C:

а — схема цепи; *б* — векторная диаграмма тока и напряжений на элементах схемы; *в* — треугольник сопротивлений; U_a — активная составляющая напряжения, совпадающая по фазе с током; U_L — индуктивная составляющая напряжения, опережающая ток на 90°; U_C — емкостная составляющая напряжения, отстающая от тока на 90°.

ных установках возникают перенапряжения, в несколько раз превышающие рабочие напряжения. В таких случаях может быть повреждена изоляция.

Явление резонанса широко используется в радиотехнике. В частности, при настройке приемника на волну (частоту) радиостанции вращают конденсатор переменной емкости до тех пор, пока контур приемника, состоящий из L и C, не настроится в резонанс на частоту, на которой работает радиостанция.

Пример 6. В сеть 220 *в*, 50 *гц* включены последовательно активное сопротивление $R=50$ *ом*, индуктивность $L=510$ *мгн* и емкость $C=50$ *мкф*. Определить: 1) полное сопротивление цепи Z; 2) силу тока I в цепи; 3) активную U_a, емкостную U_C и индуктив-

ную U_L составляющие напряжения; 4) угол сдвига фаз между током и напряжением φ.

Полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}; \quad X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}510 = 160 \text{ ом};$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^6}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 50} = 64 \text{ ом};$$

$$Z = \sqrt{50^2 + (160 - 64)^2} = 108{,}5 \text{ а}.$$

Сила тока в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{108{,}5} = 2{,}03 \approx 2 \text{ а}.$$

Составляющие напряжения

$$U_a = RI = 50 \cdot 2 = 100 \text{ в}; \quad U_L = X_L I = 160 \cdot 2 = 320 \text{ в};$$

$$U_C = X_C I = 64 \cdot 2 \approx 128 \text{ в}.$$

Угол сдвига между током и общим напряжением в цепи

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{160 - 64}{50} = 1{,}92;$$

$$\varphi = 62°30'.$$

§ 10. Цепь переменного тока с параллельно соединенными приемниками энергии

Рассмотрим цепь с двумя параллельными ветвями, в каждую из которых включен приемник энергии, обладающий активным и индуктивным сопротивлениями (рис. 52). Пусть параллельно соединены два двигателя, один из которых имеет активное сопротивление R_1 и индуктивность L_1, а другой — соответственно R_2 и L_2. Требуется найти общий ток I, потребляемый цепью, который представляет собой геометрическую сумму токов в ветвях I_1 и I_2.

В этой схеме напряжение U источника общее для обеих ветвей цепи. Поэтому векторную диаграмму начинаем строить с вектора напряжения $\dot{U}$. Затем под углом φ_1, который можно определить по величине $\cos \varphi = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}$, в сторону отставания (по часовой стрелке от вектора $\dot{U}$) откладываем вектор тока $\dot{I}_1$. Аналогично, под углом φ_2 к $\dot{U}$ откладываем вектор $\dot{I}_2$. Вектор общего тока $\dot{I}$, опреде-

ляем как геометрическую сумму векторов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$. Проектируя векторы тока на горизонтальную ось (с ней совмещен вектор напряжения $\dot{U}$), находим векторы активных токов $\dot{I}_{a1}$ и $\dot{I}_{a2}$ в ветвях с R_1 и R_2 и общий активный ток $\dot{I}_a$. На вертикальной оси получим, соответственно, реактивные токи ветвей I_{p1} и I_{p2} и общий реактивный ток $\dot{I}_p$.

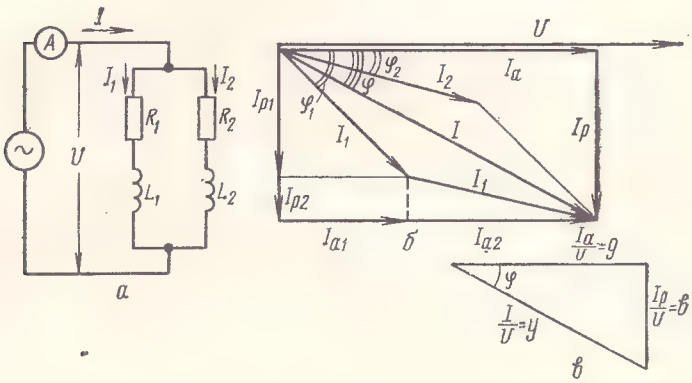


Рис. 52. Цепь с двумя параллельными ветвями, состоящими из активных сопротивлений R_1 и R_2 и индуктивностей L_1 и L_2:

а — схема цепи; *б* — векторная диаграмма напряжения и токов; *в* — треугольник проводимостей.

Из полученной диаграммы можно записать следующие соотношения. Общий активный ток

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2; \qquad I_a = I \cos \varphi. \quad (128)$$

Общий реактивный ток

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2. \quad (129)$$

Полный ток

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} + I_{p2})^2}. \quad (130)$$

Активная мощность, потребляемая всей схемой,

$$P = UI_a = UI \cos \varphi = U (I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2). \quad (131)$$

Этот метод расчета при большом числе параллельных ветвей очень неудобен. Поэтому при определении силы тока в общей цепи для схем с параллельными ветвями поль-

зуются методом проводимостей. Рассмотрим этот метод применительно к схеме, изображенной на рисунке 52,*а*. Действующие токи в первой и во второй ветвях на схеме могут быть определены как

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{U}{Z_2}, \tag{132}$$

где

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \quad \text{и} \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} -$$

полные сопротивления параллельных ветвей.

Величины, обратные полным сопротивлениям, то есть $\frac{1}{Z_1}$ и $\frac{1}{Z_2}$, называются полными проводимостями и обозначаются y_1 и y_2;

$$y_1 = \frac{1}{Z_1} \quad \text{и} \quad y_2 = \frac{1}{Z_2} \quad \text{или} \quad Z_1 = \frac{1}{y_1} \quad \text{и} \quad Z_2 = \frac{1}{y_2}.$$

Заменяя в формуле (132) величину Z величиной $\frac{1}{y}$, получим

$$I_1 = Uy_1 \quad \text{и} \quad I_2 = Uy_2. \tag{133}$$

Активные составляющие этих токов

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = Ug_1 \tag{134}$$

и

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = Ug_2,$$

где $g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}$ и $g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}$ — активные проводимости первой и второй ветвей.

Реактивные составляющие токов в первой и второй ветвях

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{X_1}{Z_1} = U \frac{X_1}{Z_1^2} = Ub_1 \quad \text{и} \quad I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = Ub_2,$$

где $\sin \varphi = \frac{X_1}{Z_1}$ — из треугольника сопротивлений;

$b_1 = \frac{X_1}{Z_1^2}$ и $b_2 = \frac{X_2}{Z_2^2}$ — реактивные проводимости цепей.

Общие токи в ветвях

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = \sqrt{U^2 g_1^2 + U^2 b_1^2} = U \sqrt{g_1^2 + b_1^2}; \\ I_2 &= \sqrt{I_{a2}^2 + I_{p2}^2} = \sqrt{U^2 g_2^2 + U^2 b_2^2} = U \sqrt{g_2^2 + b_2^2}. \end{aligned} \tag{135}$$

Сопоставляя формулы (133) и (135), можно заметить, что

$$y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_1^2} \quad \text{и} \quad y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_2^2}, \tag{136}$$

то есть активная, реактивная и полная проводимости связаны между собой как стороны прямоугольного треугольника. Действительно, треугольник проводимостей можно получить из треугольника токов I, I_a и I_p (рис. 52, *б*), если каждую из его сторон разделить на общее напряжение U. Этот треугольник проводимостей представлен на рисунке 52, *в*.

Продолжая расчет токов в схеме, показанной на рисунке 52, *а*, получим активную и реактивную составляющие общего тока:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = Ug_1 + Ug_2 = U(g_1 + g_2) = Ug;$$
$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = Ub_1 + Ub_2 = U(b_1 + b_2) = Ub,$$

где $g = g_1 + g_2$ и $b = b_1 + b_2$ — соответственно активная и реактивная проводимости всей цепи.

Общий ток может быть получен как

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(Ug)^2 + (Ub)^2} = U\sqrt{g^2 + b^2} = Uy, \tag{137}$$

где $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ — полная проводимость всей цепи.

Активную P, реактивную Q и полную S мощности всей цепи можно определить как

$$P = UI_a = UUg = U^2g; \tag{138}$$
$$Q = UI_p = UUb = U^2b;$$
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{U^4g^2 + U^4b^2} = U^2\sqrt{g^2 + b^2} = U^2y.$$

Рассмотрим теперь случай параллельного включения двух цепей (рис. 53), в одну из которых включено активное сопротивление и индуктивность, а в другую — активное сопротивление и емкость.

Векторную диаграмму следует начинать строить с вектора напряжения $\dot{U}$. Затем определять $\cos\varphi_1$ и $\cos\varphi_2$. Причем $\cos\varphi_1$ будет отстающим (в цепь включена индуктивность), а $\cos\varphi_2$ опережающим (в цепь включена емкость):

$$\cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}; \quad \cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}.$$

По $\cos\varphi_1$ и $\cos\varphi_2$ определяют углы φ_1 и φ_2, а затем под этими углами к напряжению откладывают соответствующие им векторы токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$. Вектор общего тока в цепи $\dot{I}$ равен геометрической сумме векторов токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$.

Как видно из векторной диаграммы, общий ток

$$I = \sqrt{(I_{a1}+I_{a2})^2+(I_{p1}-I_{p2})^2},$$

где $I_{p1}-I_{p2}=I_p$ — реактивный ток в общей ветви, равный разности реактивных токов в первой и во второй ветвях.

Выделив на векторной диаграмме (рис. 53,*б*) треугольник токов I, $I_a=I_{a1}+I_{a2}$ и $I_p=I_{p1}-I_{p2}$ и поделив их

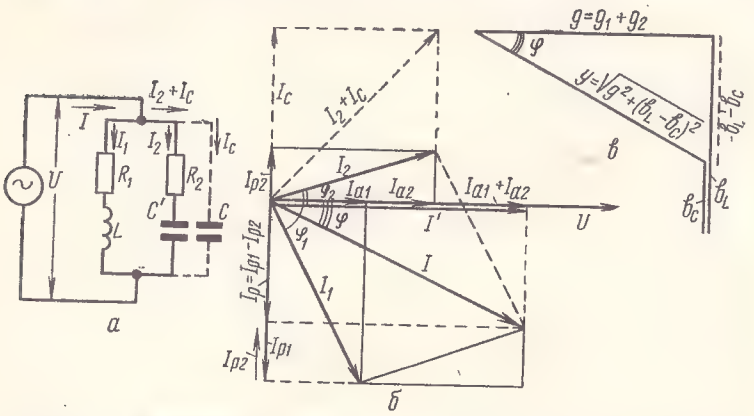


Рис. 53. Параллельные цепи, в одной из которых включено активное сопротивление и индуктивность, а в другой — активное сопротивление и емкость:

а — схема цепи; *б* — векторная диаграмма напряжения и токов в цепи; *в* — треугольник проводимостей.

на общее для них напряжение U, получим треугольник проводимостей y, g, b_L-b_C,

где b_L — реактивная проводимость ветви с индуктивностью;

b_C — реактивная проводимость ветви с емкостью.

Из этого треугольника следует, что

$$y = \sqrt{(g_1+g_2)^2+(b_L-b_C)^2},$$

то есть полная проводимость равна корню квадратному из суммы квадратов результирующих активных и реактивных проводимостей. Общий ток в неразветвленном участке

$$I = Uy = U\sqrt{(g_1+g_2)^2+(b_L-b_C)^2}. \qquad (139)$$

Угол сдвига тока I относительно напряжения может быть найден из треугольника проводимостей по величине тангенса

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{b_L-b_C}{g_1+g_2}.$$

Рассмотрим случай, когда $b_L=b_C$, $\operatorname{tg}\varphi=0$ и угол $\varphi=0$. Практически этого можно достигнуть, если параллельно первым двум ветвям дополнительно подключить конденсатор C такой емкости, чтобы сила емкостного тока в новой ветви I_C была $I_C = I_p$. Тогда реактивный индуктивный ток и реактивный емкостный ток полностью скомпенсируют друг друга. В общей ветви, как видно из векторной диаграммы, будет протекать только ток

$$I' = I_{a1} + I_{a2},$$

то есть только активный ток.

Из формулы (139) общий ток

$$I = U\sqrt{(g_1+g_2)^2+(0)^2} = U(g_1+g_2) = Ug.$$

Это явление носит название р е з о н а н с а т о к о в. При резонансе токов оказываются равными реактивные индуктивная Q_L и емкостная Q_C мощности, так как

$$Q_L = U^2 b_L \quad \text{и} \quad Q_C = U^2 b_C.$$

Из рисунков 45, *г* и 48, *г* видно, что в отрезке времени, когда мгновенное напряжение возрастает от 0 до максимального как положительного, так и отрицательного значений, мгновенная мощность в цепи с индуктивностью (рис. 45, *г*, полупериоды *I* и *III*) имеет положительное значение, то есть цепь с индуктивностью в этот момент потребляет энергию из сети, а в цепи с емкостью (рис. 48, *г*, полупериоды *II* и *IV*) — отрицательное значение, так как конденсаторы в этот момент разряжаются и отдают энергию в цепь.

Таким образом, при резонансе токов энергия магнитного поля индуктивности переходит в энергию электрического поля конденсатора и обратно, а энергия от источника расходуется только в сопротивлениях R_1 и R_2.

Явление компенсации реактивного тока используют для улучшения (компенсации) косинуса фи в электроустановках.

§ 11. Убытки от низкого cos φ и его компенсация

В наиболее распространенных приемниках электрической энергии — асинхронных двигателях, трансформаторах, сварочных аппаратах и других — реактивный ток является индуктивным и отстает по фазе от напряжения. Он необходим для создания вращающегося магнитного поля у электрических машин и переменного магнитного потока трансформаторов.

Величина cos φ в сетях с чисто активной нагрузкой равна 1 (освещение лампами накаливания, нагревательные приборы); в сетях со смешанной нагрузкой (двигатели и освещение) с преобладанием освещения лампами накаливания cos φ обычно равен 0,95—0,98; в сетях с преобладанием силовой нагрузки cos φ может снизиться до 0,7—0,8.

Косинус фи особенно сильно снижается при работе двигателей и трансформаторов вхолостую или при большой недогрузке.

Если в сети есть индуктивный ток, мощность генератора, трансформаторных подстанций и сетей используется не полностью. С уменьшением cos φ значительно возрастают потери энергии на нагрев проводов и обмоток электрических аппаратов.

Например, если активная мощность остается постоянной, обеспечивается током 100 *а* при cos φ=1, то при понижении cos φ до 0,8 и той же мощности сила тока в сети возрастает в 1,25 раза $\left(I_{\text{а}} = I_{\text{сети}} \cos\varphi,\ I_{\text{сети}} = \frac{I_{\text{а}}}{\cos\varphi} = \frac{100}{0{,}8} = 125a\right)$. Потери на нагрев проводов сети и обмоток генератора (трансформатора) $P_{\text{нагр}} = I^2_{\text{сети}} R_{\text{сети}}$ пропорциональны квадрату тока, то есть они возрастают в $1{,}25^2 = 1{,}56$ раза. При cos φ=0,5 сила тока в сети при той же активной мощности равна $\frac{100}{0{,}5} = 200$ *а*, а потери в сети возрастают в 4 раза (!). Возрастают потери напряжения в сети, что нарушает нормальную работу других потребителей. Счетчик потребителя во всех случаях отсчитывает одно и то же количество потребляемой активной энергии в еди-

ницу времени, но в последнем случае генератор подает в сеть силу тока, в 2 раза бóльшую, чем в первом. Нагрузка же генератора (тепловой режим) определяется не активной мощностью потребителей, а полной мощностью в киловольт-амперах, то есть произведением напряжения на силу тока, протекающего по обмоткам.

Для повышения cos φ электрических установок применяют компенсацию реактивной мощности. Увеличения cos φ (уменьшения угла φ — сдвига фаз тока и напряжения) можно добиться следующими способами: 1) заменой мало загруженных двигателей двигателями меньшей мощности; 2) понижением напряжения

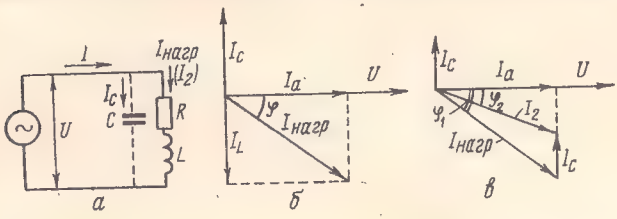


Рис. 54. Включение конденсаторов для компенсации реактивной мощности (улучшения cos φ):

а — схема; *б* — векторная диаграмма при полной компенсации (до cos φ=1); *в* — векторная диаграмма частичной компенсации (до cos φ, близкого к 1).

на обмотках мало нагруженных двигателей; 3) выключением двигателей и трансформаторов, работающих на холостом ходу; 4) включением в сеть специальных компенсирующих устройств, являющихся генераторами опережающего (емкостного) тока. На мощных районных подстанциях для этой цели специально устанавливают синхронные компенсаторы — синхронные перевозбужденные электродвигатели.

Для компенсации cos φ в электрических установках до нескольких сотен *ква* применяют косинусные конденсаторы типа КМ. Их выпускают на напряжение от 0,22 до 10 *кв*. В паспорте указано напряжение в *кв*, емкость в *мкф* и мощность в *квар*. Для компенсации cos φ у сварочных трансформаторов выпускают конденсаторы КМС.

Емкость статических конденсаторов для компенсации выбирают следующим образом.

На рисунке 54 приведена схема нагрузки, состоящей из R и X_L и вызывающей угол сдвига фаз φ между напряже-

нием и током. Для полной компенсации угла сдвига фаз (доведения φ до 0°, а $\cos\varphi$ до 1) включают емкость C (группу конденсаторов) параллельно нагрузке. Полная компенсация (рис. 54, *б*) будет достигнута, если емкостный ток через конденсаторы будет равен индуктивному, то есть

$$I_C = I_L,$$

где

$$I_L = I_{\text{нагр}} \sin\varphi.$$

Емкостный ток

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \omega C U,$$

где U — напряжение сети (*в*);

ω — угловая частота переменного тока, равная $2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314$;

C — емкость конденсаторов (*ф*).

Отсюда емкость компенсирующих устройств

$$C = \frac{I_C}{\omega U} = \frac{I_{\text{нагр}} \sin\varphi U}{\omega U U} = \frac{S \sin\varphi}{\omega U^2} = \frac{P \operatorname{tg}\varphi}{\omega U^2}. \qquad (140)$$

Если необходима частичная компенсация сдвига фаз (рис. 54,*в*), то емкостный ток

$$I_C = I_a \operatorname{tg}\varphi_1 - I_a \operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{P}{U}(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = U\omega C,$$

откуда

$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \qquad (141)$$

где P — активная мощность нагрузки (*вт*).

Пример 7. Освещение в помещении выполнено люминесцентными лампами ЛБ-40 (мощность 40 *вт*, а потребляемая из сети лампой и дросселем мощность равна 50 *вт*). В цепи такой лампы $\cos\varphi = 0{,}5$. Напряжение в сети $U = 220$ *в*. Определить емкость конденсатора для компенсации реактивной мощности.

1. Определяем значение $\operatorname{tg}\varphi$:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{1-\cos^2\varphi}}{\cos\varphi} = \frac{\sqrt{1-0{,}5^2}}{0{,}5} = \frac{\sqrt{0{,}75}}{0{,}5} = \frac{0{,}866}{0{,}5} = 1{,}73.$$

2. Определяем емкость потребного конденсатора:

$$C = \frac{P \operatorname{tg}\varphi}{\omega U^2} = \frac{50 \cdot 1{,}73}{314 \cdot 220^2} = \frac{86{,}5}{15{,}2 \cdot 10^6} = 5{,}7 \cdot 10^{-6}\ ф, \text{ или } 5{,}7\ мкф.$$

Выбираем конденсатор стандартной емкостью 4 *мкф* или 6 *мкф*. Можно принять конденсатор типа КБГ МН на рабочее напряжение 400 *в*.

Глава VII

Трехфазный переменный ток

§ 1. Генерирование трехфазного тока

Система трехфазного переменного тока изобретена в 1888 г. выдающимся русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским. Основным преимуществом трехфазного тока перед однофазным является простота получения с помощью трехфазного тока вращающегося магнитного поля, на применении которого основано устройство наиболее простых по конструкции и в эксплуатации электродвигателей, получивших наибольшее распространение,— трехфазных асинхронных электродвигателей.

Система трехфазного тока, кроме того, дает экономию проводов линий передач. Мощность при однофазном токе

$$P_0 = UI\cos\varphi$$

передается по двум проводам. Мощность при трехфазном токе

$$P_т = \sqrt{3}UI\cos\varphi$$

передается по трем проводам. То есть увеличение мощности в $\frac{P_т}{P_0} = \sqrt{3} = 1{,}73$ раза (на 73%) требует увеличения общего сечения проводов в $3/2 = 1{,}5$ раза (на 50%).

При рассмотрении принципа устройства генератора переменного тока было принято, что проводник вращается в неизменяющемся ни по величине, ни по направлению магнитном поле. Но в конечном счете совершенно безразлично, перемещается ли проводник в стационарном (не меняющемся) магнитном поле или магнитное поле перемещается относительно неподвижного проводника, то есть магнит можно расположить на роторе и вращать его, а обмотку, в которой индуктируется э. д. с., разместить на статоре — неподвижной части машины.

В этом случае имеется ряд преимуществ машины: полученный переменный ток можно отводить в сеть без контактных колец. Для усиления магнитного поля на роторе

располагают обмотку и через два кольца подводят постоянный ток от аккумуляторов, от выпрямителей или от небольшого по мощности по сравнению с основным генератором дополнительного генератора постоянного тока.

На рисунке 55 представлена принципиальная схема генератора трехфазного переменного тока. На статоре расположены три обмотки. В каждой из них индуктируется однофазный ток, который может быть использован независимо от токов, получаемых в других обмотках. Но в этом случае на каждую обмотку генератора надо два

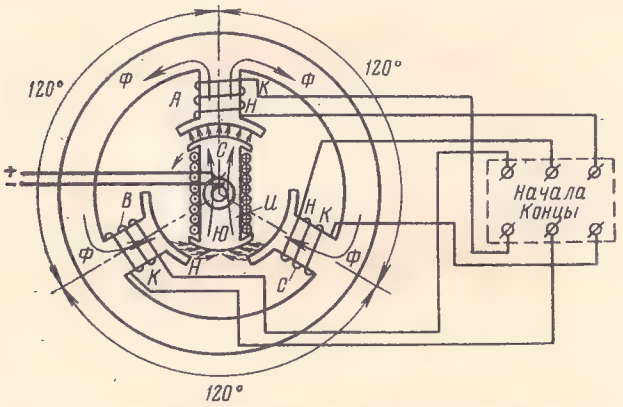


Рис. 55. Принципиальная схема генератора трехфазного тока:

А, В и С — статорные обмотки-фазы (якорь); *И* — вращающийся электромагнит (индуктор).

провода, то есть всего шесть проводов. В объединенной схеме, имеющей четыре провода (рис. 61), эти обмотки принято называть ф а з а м и: фаза *А*, фаза *В*, фаза *С*. Они сдвинуты одна относительно другой на 120°. При вращении магнита в обмотках статора индуктируются равные по величине и частоте э. д. с. Но эти э. д. с. сдвинуты одна относительно другой на 120°. Например, положительный максимум э. д. с. (наводимый силовыми линиями, исходящими из северного полюса) в фазе *А* возникнет в момент, показанный на рисунке 55. Положительный максимум э. д. с. в фазе *В* будет наведен в тот момент, когда ротор повернется на угол 120°, а в фазе *С* — на угол 240° и т. д. (рис. 56).

Частота f колебаний э. д. с. связана с числом оборотов n ротора и числом пар полюсов p формулой

$$f = \frac{np}{60} \text{ гц}.$$

Для генератора, показанного на рисунке 55, $p = 1$. Чтобы получить частоту $f = 50$ *гц*, нужно создать число оборотов ротора

$$n = \frac{f60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{p} = \frac{3000}{1} = 3000 \text{ об/мин}.$$

На рисунке 57 изображена схема генератора, у которого число пар полюсов $p=2$. В этой машине за один обо-

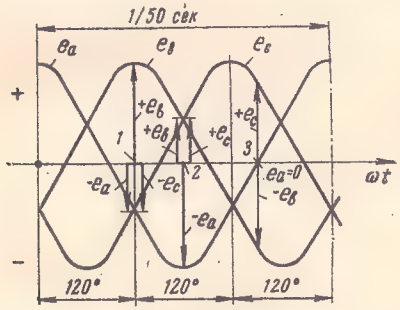


Рис. 56. Совместная диаграмма э. д. с., генерируемых в трех фазах:
e_a, e_b, e_c, — э. д. с., генерируемые соответственно в обмотках генератора *A*, *B* и *C*.

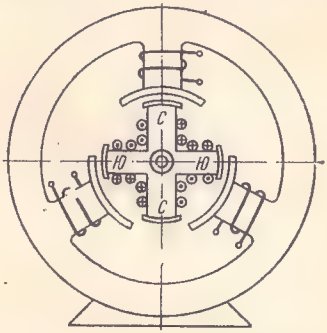


Рис. 57. Схема устройства генератора при $p=2$.

рот ротора в каждой обмотке (фазе) статора совершится два полных колебания э. д. с. Чтобы частота в сети составила $f=50$ *гц*, число оборотов ротора должно быть

$$n = \frac{3000}{p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ об/мин}.$$

Направление индуктируемой э. д. с. в каждый момент определяют правилом правой руки.

На клеммную доску генератора выводят три начала и три конца (рис. 55) фазных обмоток. Каждая пара *H* и *K* представляет собой отдельный источник переменного однофазного тока.

§ 2. Соединение источников тока

Если имеются два источника постоянного тока, каждый из которых имеет э. д. с. E, то их можно использовать или отдельно, как показано на рисунке 58, *а*, или соединив их, как показано на рисунке 58, *б*. В первом случае надо использовать четыре провода, а во втором только три, но потребитель получает в свое распоряжение две э. д. с. (напряжения): E и $2E$. Таким образом, система, показанная на рисунке 58, *б*, имеет два существенных преимущества: три провода вместо четырех и два напряжения вместо одного.

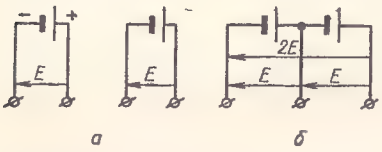


Рис. 58. Передача энергии от двух источников тока с помощью четырех (*а*) и трех (*б*) проводов.

Аналогичное, экономически целесообразное соединение мы можем использовать в системе трех однофазных токов, сдвинутых друг относительно друга и меняющихся по одному и тому же закону. В каждое мгновение сумма * трех э. д. с. равна 0. Обратимся к диаграмме э. д. с., генерируемых в трех фазах (рис. 56). Для точки *1* (120°) э. д. с. $e_в$ в фазе B максимальная, положительная (направлена вверх от нулевой линии ординат). Э. д. с. в фазах A и C соответственно e_a и e_c имеют отрицательное значение, и каждая из них, как видно из рисунка, в 2 раза меньше по абсолютной величине, чем $e_в$. Складывая все три э. д. с., получим нуль. Аналогично для точки *2* э. д. с. e_a в фазе A имеет максимальное отрицательное значение, а $e_в$ и e_c имеют положительные знаки, но их абсолютные величины в 2 раза меньше, чем абсолютная величина e_a. Складывая все три э. д. с., получаем в результате нуль. Для точки *3* величина $e_a=0$, а э. д. с. $e_в$ и e_c равны по величине, но противоположны по знаку. В сумме они равны нулю.

Тот же результат от сложения векторов трех э. д. с. мы получим, если представим себе три однофазные э. д. с. в виде звезды одинаковых по длине векторов $\dot{E}$, сдвинутых друг относительно друга на угол 120° и вращающихся со

---

* Здесь и далее речь идет об алгебраической сумме мгновенных величин э. д. с. и токов.

скоростью 50 оборотов в секунду. В каждый момент времени сумма их будет равна нулю. К вектору $\dot{E}_в$ приложен вектор $\dot{E}_c$ и вектор $\dot{E}_a$, сумма их равна нулю (получился замкнутый треугольник) (рис. 59, *а*). Это положение векторов соответствует моменту *1* на диаграмме (рис. 56). Спроектировав на вертикальную ось все три э. д. с., получим картину векторов, ранее взятую с диаграммы для точки *1*. Повернув векторы на угол 60°, придем к диаграмме векторов на рисунке 59, *б*. Их проекции на вертикальную

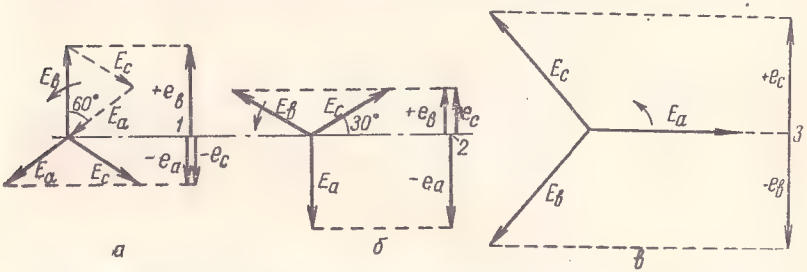


Рис. 59. Сложение векторов действующих значений э. д. с. (E) и мгновенных значений э. д. с. (e).

ось повторяют картину векторов, взятую с диаграммы рисунка 56 для точки *2*. Повернув звезду векторов еще на угол 90°, придем к диаграмме рисунка 59,*в*, соответствующей картине векторов для точки *3* на диаграмме рисунка 56.

Аналогично будут изменяться и токи в трех фазах, если нагрузки на каждой из них равны между собой. И в каждый момент их сумма будет равна нулю. Если нагрузки в фазах активные, то звезда токов совпадает со звездой э. д. с. (рис. 60, *а*). Если в каждую из фаз включено чисто индуктивное сопротивление, то ток в каждой из фаз отстает от э. д. с. на 90° (рис. 60,*б*). Если нагрузка емкостная, токи опережают э. д. с. на 90° (рис. 60, *в*).

Поскольку сумма токов в трех фазах равна нулю,

$$i_a + i_в + i_c = 0, \qquad (142)$$

в каждый момент сумма токов в двух любых фазах равна по абсолютной величине, но противоположна по знаку току в третьей фазе, а именно из равенства (142) можно заключить:

$$i_a = -i_в - i_c; \quad i_a + i_в = -i_c;$$
$$i_в + i_c = -i_a \text{ и т. д.} \qquad (143)$$

То есть ток, который в любой момент истекает из какой-либо фазы, равен сумме токов, возвращающихся в две другие фазы, и наоборот. Так, для точки *1* (рис. 56) ток в фазе *B* идет во внешнюю цепь, а по фазам *A* и *C* возвращается к источнику и т. д.

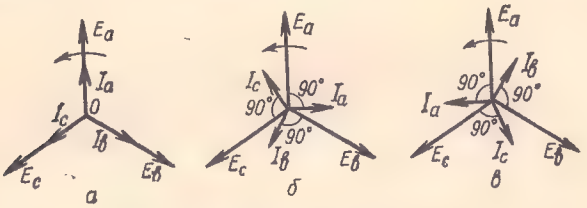


Рис. 60. Векторные диаграммы э. д. с. и токов в трехфазной системе:
а — активная нагрузка; *б* — индуктивная нагрузка; *в* — емкостная нагрузка.

Рассмотренные выше зависимости между э. д. с. (напряжениями) и токами для трехфазной системы позволяют соединять фазы в этих системах звездой или треугольником.

§ 3. Соединение фаз звездой

На рисунке 61 представлена схема соединения фаз генератора звездой. Условное обозначение этой схемы $\curlyvee$. Концы *K* всех трех фаз соединяют в общую точку, называемую нулевой. Если отводят только три провода от генератора *A*, *B*, *C*, то такую систему называют трехфазной трехпроводной. Если отводят также четвертый, нейтральный, или «нулевой» провод *N* (*O*), то систему называют трехфазной четырехпроводной. Нулевую точку генератора, а следовательно, и нулевой провод надежно заземляют.

Ток в нулевом проводе появится только тогда, когда три фазы будут нагружены неравномерно. Ток, протекающий по нулевому проводу, равен алгебраической сумме токов в трех фазах:

$$i_n = i_a + i_в + i_c. \qquad (144)$$

По абсолютной величине i_n всегда меньше, чем ток в любой из фаз, если нагрузка включена во все фазы. Поэтому сечение нулевого провода принимается меньшим, чем сечение фазных проводов.

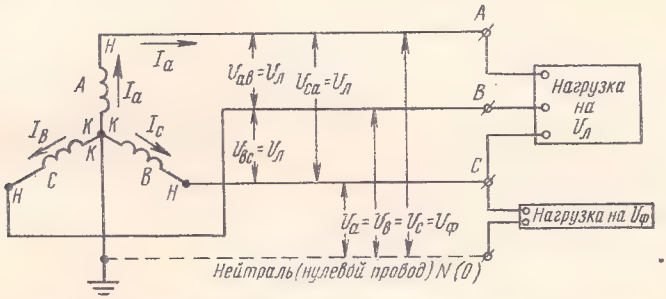


Рис. 61. Схема соединений обмоток генератора в звезду.

Только в том случае, если нагрузка включена между одной из фаз и нулевым проводом, а к другим фазам нагрузка не включена, ток в нагруженной фазе равен току в нулевом проводе.

Напряжение между любой из фаз и нулевым проводом называется фазным напряжением и обозначается $U_ф$. Оно равно напряжению между началом каждой из фаз и ее концом (рис. 62).

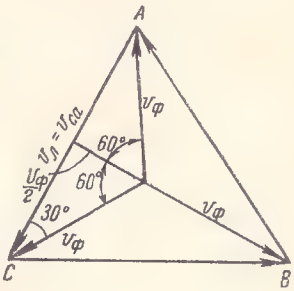


Рис. 62. Векторы линейных и фазных напряжений.

Напряжение между фазными проводами называется линейным напряжением и обозначается $U_л$. Оно равно геометрической разности двух фазных напряжений (рис. 62), то есть линейные напряжения между фазами A и B, B и C, C и A

$$\dot{U}_{AB}=\dot{U}_A-\dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC}=\dot{U}_B-\dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA}=\dot{U}_C-\dot{U}_A.$$

Абсолютная величина линейного напряжения может быть определена из треугольника векторов AOB. Основание этого треугольника AB равно линейному напряжению:

$$U_{AB}=U_л=2\sqrt{U_ф^2+\left(\frac{U_ф}{2}\right)^2}=2\sqrt{\frac{3U_ф^2}{4}}=\sqrt{3}U_ф, \qquad (145)$$

или

$$\frac{U_л}{U_ф}=\sqrt{3}. \qquad (146)$$

Таким образом, в трехфазной четырехпроводной системе получают два напряжения: $U_ф$ — фазное и $U_л$ — линейное. Линейное напряжение больше, чем фазное, в $\sqrt{3}=1{,}73$ раза. Сила тока в линейном проводе $I_л$ равна по величине и направлению току в фазной обмотке $I_ф$.

В Советском Союзе приняты следующие напряжения для низковольтных сетей (табл. 7).

Таблица 7

Стандартные напряжения в потребительских сетях

Номинальные напряжения сетей и токоприемников $U_л/U_ф$ (*в*)	Напряжения на зажимах генераторов $U_л/U_ф$ (*в*)	Первичные обмотки повышающих трансформаторов $U_л$ (*в*)	Вторичные обмотки понижающих трансформаторов $U_л/U_ф$ (*в*)
220/127	230/133	220	230/133
380/220	400/230	380	400/230
660/380	690/400	660	690/400

Как видно из таблицы 7, напряжение источника электроснабжения (генератора или вторичной стороны трансформатора) берут всегда на 5% больше номинального сетевого напряжения с учетом того обстоятельства, что около 5% напряжения будет потеряно в линии. Это делают для того, чтобы подать потребителям электроэнергию номинального напряжения и обеспечить их удовлетворительную работу.

В сельском хозяйстве наибольшее распространение получила трехфазная четырехпроводная система 380/220 *в*, то есть система с линейным напряжением в сети $U_л=380$ *в* и фазным $U_ф=220$ *в*. Три фазы с напряжением между ними 380 *в* используют для питания электрических двигателей и трехфазных нагревательных приборов, а напряжение между фазой и нулевым проводом 220 *в* ис-

пользуют для питания источников света и бытовых электроприборов.

Если плотность потребителей большая (в городах), применяют систему 220/127 *в*, где трехфазное линейное напряжение 220 *в* используют для включения двигателей, а фазное напряжение 127 *в* для освещения. Это обстоятельство связано с тем фактом, что чем ниже напряжение, тем экономичнее освещение (см. главу XXV). Из вышеизложенного следует:

$$\frac{U_л}{U_ф} = \frac{380}{220} = \frac{220}{127} = \sqrt{3} = 1{,}73. \qquad (147)$$

§ 4. Соединение фаз треугольником

При соединении фазных обмоток трехфазного генератора треугольником (рис. 63) начало H' одной фазы соединяют с концом K'' другой, начало другой H'' — с концом третьей K''' и начало третьей H''' фазы соединяют с концом первой H'.

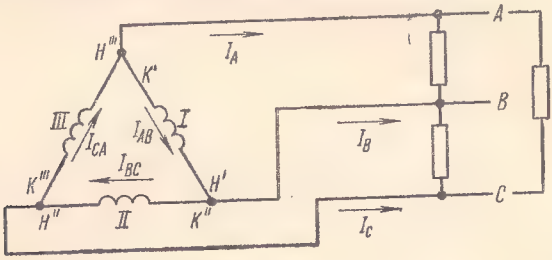


Рис. 63. Соединение обмоток генератора треугольником.

Фазные обмотки генератора образуют замкнутый контур с малым внутренним сопротивлением. Но при симметричных э. д. с. (равных по величине и одинаково сдвинутых друг относительно друга) в фазах и при отключенной внешней цепи ток в этом контуре равен нулю, так как сумма трех симметричных э. д. с. в любой момент равна нулю. При таком соединении напряжения между линейными проводами равны напряжениям на фазных обмотках:

$$U_{AB} = U_ф; \quad U_{BC} = U_ф; \quad U_{CA} = U_ф.$$

Если все три фазы генератора нагружены совершенно одинаково, то в линейных проводах текут равные токи. Каждый из этих линейных токов равен геометрической разности токов в двух смежных фазах. Так, вектор линейного тока I_C равен геометрической сумме векторов в фазах I_{CA} и I_{BC} (рис. 64, *а*). Векторы фазных токов сдвинуты друг относительно друга на угол 120° (рис. 64, *б*).

Из рисунка 64, *б* следует, что абсолютная величина линейного тока

$$I_л = I_ф \cos 30° + I_ф \cos 30° = 2I_ф \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_ф. \quad (148)$$

Аналогично обмоткам генератора трехфазную нагрузку можно включать в звезду и треугольник.

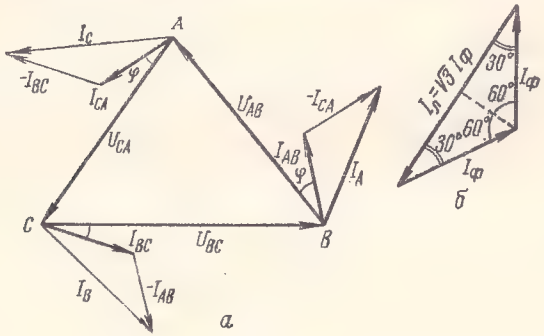


Рис. 64. Векторная диаграмма токов.

Так, трехфазные электрические двигатели рассчитаны на соединение обмоток в зависимости от напряжения в сети в звезду Y или в треугольник △ (см. гл. XI).

Если в сети нет нулевого провода и, таким образом, потребитель имеет в своем распоряжении три линейных напряжения, он может искусственно создать фазные напряжения. Для этой цели три одинаковых сопротивления (нагрузки) включают в сеть по схеме звезда. Каждая из этих нагрузок окажется включенной на фазное напряжение (рис. 65):

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}.$$

Соединение обмоток генератора по схеме треугольник применяют главным образом на передвижных электростанциях небольшой мощности с ограниченной по протяженности сетью (электростанции электростригальных агрегатов и др.).

В четырехпроводной трехфазной системе нулевой провод надежно заземлен на электростанции, на ответвлениях сети и через определенные расстояния по линии. Этот провод используется для заземления металлических корпусов токоприемников у потребителя (см. гл. XIX, § 4).

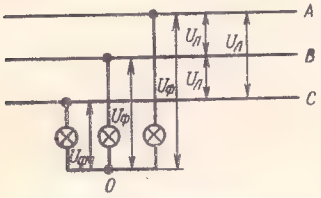


Рис. 65. Включение трех равных по сопротивлению токоприемников по схеме звезда в три линейных провода.

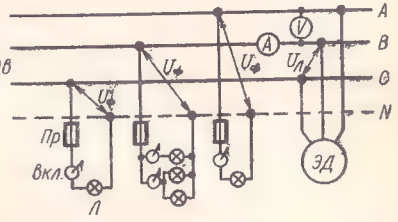


Рис. 66. Схема включения в трехфазную четырехпроводную сеть осветительной (220 *в*) и силовой (380 *в*) нагрузок.

На рисунке 66 приведена схема включения в трехфазную четырехпроводную сеть осветительной и силовой нагрузок. Осветительная нагрузка включена на фазное напряжение 220 *в*. Стремятся равномерно загрузить однофазной нагрузкой все три фазы. С этой целью по одной улице населенного пункта для освещения проводят одну фазу с нулевым проводом, по другой — вторую фазу и нулевой провод, по третьей — третью и нулевой провод и т. д. Силовую нагрузку (электродвигатели, сварочные трансформаторы), а также мощные нагревательные трехфазные приборы включают на линейное напряжение.

§ 5. Мощность трехфазного тока

Мощность трехфазной системы равна сумме мощностей отдельных фаз. При симметричных и равных по величине напряжениях и токах:

$$P = 3U_ф I_ф \cos \varphi, \qquad (149)$$

где P — мощность трехфазной системы (*вт*);
$U_ф$ — фазное напряжение (*в*);
$I_ф$ — фазный ток (*а*);
φ — угол сдвига фаз напряжения и тока.

При соединении в звезду $I_ф = I_л$, а $U_л = \sqrt{3}\, U_ф$, или

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}},$$

и равенство (149) принимает вид

$$P = 3\frac{U_л}{\sqrt{3}} \cdot I_л \cos\varphi = \sqrt{3}\, U_л I_л \cos\varphi. \qquad (150)$$

При соединении в треугольник

$$I_ф = \frac{I_л}{\sqrt{3}} \quad \text{и} \quad U_л = U_ф.$$

Аналогично

$$P = 3U_л \frac{I_л}{\sqrt{3}} \cos\varphi = \sqrt{3} U_л I_л \cos\varphi = \sqrt{3} UI \cos\varphi, \qquad (151)$$

где U и I величины напряжения и тока в сети, измеренные соответственно вольтметром, включенным между двумя линейными проводами, и амперметром, включенным в рассечку линейного провода.

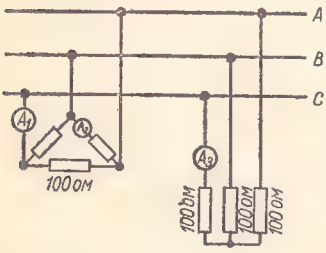


Рис. 67. К примеру 2.

Пример 1. Определить мощность генератора трехфазного тока, если линейное напряжение $U_л = 380$ *в*, линейный ток $I_л = 50$ *а*, а $\cos\varphi = 0{,}85$.

$$P = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 50 \cdot 0{,}85 = 28\,000 \text{ вт} = 28 \text{ квт}.$$

Пример 2. В трехфазную сеть 380 *в* включены три одинаковых сопротивления $R = 100$ *ом* треугольником и три таких же сопротивления звездой (рис. 67). Что покажут амперметры A_1, A_2 и A_3?

При соединении сопротивлений R треугольником к каждому из них приложено напряжение 380 *в*. Поэтому фазный ток $I_ф$, замеренный амперметром A_2,

$$I_ф = \frac{U_л}{R} = \frac{380}{100} = 3{,}8 \text{ а}.$$

Амперметр A_1 покажет линейный ток $I_л$, равный $\sqrt{3}\, I_ф$:

$$I_л = \sqrt{3} \cdot 3{,}8 \approx 6{,}6 \text{ а}.$$

При соединении сопротивлений R звездой $I_л = I_ф$. Этот ток покажет амперметр A_3. В этом случае к каждому из сопротивлений R приложено фазное напряжение $U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = 220$ *в*. Величина тока в каждом из них $I_л = I_ф = \frac{220}{100} = 2{,}2$ *а*, то есть линейный ток при соединении нагрузки звездой в 3 раза (!) меньше, чем при соединении той же нагрузки в треугольник.

Пример 3. Трехфазный электродвигатель имеет мощность на валу 15 *л. с.*, коэффициент полезного действия $\eta = 82\%$ и коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}8$. Двигатель подключен к трехфазной сети 220 *в*. Определить ток, потребляемый электродвигателем из сети при полной нагрузке, и напряжения, которые приложены к обмоткам двигателя, соединенным звездой.

1. Мощность электродвигателя на валу (эффективная мощность)

$$P_{эф} = 15 \cdot 736 \approx 11\,000 \text{ } вт.$$

2. Мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P = \frac{P_{эф}}{\eta} = \frac{11\,000}{0{,}82} = 13\,500 \text{ } вт.$$

3. Линейный ток

$$I_л = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos\varphi} = \frac{13\,500}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0{,}8} = 44 \text{ } а.$$

4. Фазное напряжение

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ } в.$$

Глава VIII

Измерения электрических величин

§ 1. Электрические величины и единицы измерения

Практика эксплуатации электрических установок всегда связана с измерением таких электрических величин, как напряжение, сила тока, сопротивление, мощность, энергия и частота. Измерения позволяют определить качество и количество электроэнергии, узнать, соблюдаются ли установленные режимы и правильно ли ведется эксплуатация электроустановки, а также учесть расход электрической энергии.

Таблица 8

Условные обозначения электрических величин и единиц их измерения

Электрическая величина	Условное обозначение величины	Единицы измерения	Условное обозначение единиц		Прибор для измерения	Примечание
			принятое в СССР	международное		
Напряжение	*U*	вольт, киловольт и др.	*в* *кв*	*V* *kV*	Вольтметр	1 *кв* = 1000 *в*
Сила тока	*I*	ампер, миллиампер и др.	*а* *ма*	*A* *mA*	Амперметр	1 *ма* = 0,001 *а*
Сопротивление	*R*	ом мегом	*ом* *Мом*	Ω *MΩ*	Омметр Мегомметр	1 *Мом* = = 1 000 000 *ом*
Мощность активная	*P*	ватт киловатт	*вт* *квт*	*W* *kW*	Ваттметр	1 *квт* = 1000 *вт*
Мощность полная	*S*	вольт-ампер киловольт-ампер	*ва* *ква*	*VA* *kVA*	Определяется как произведение показаний вольтметра и амперметра	1 *ква* = 1000 *ва*
Энергия активная	*W*	джоуль, или ватт-секунда, киловатт-час, гектоватт-час	*дж* *вт·сек* *квт·ч* *гвт·ч*	*J* *WS* *kWh* *hWh*	Счетчик	1 *гвт·ч* = = 0,1 *квт·ч*
Частота	*f*	герц	*гц* *пер/сек*	*Hz*	Частотомер	В СССР принята *f* = 50 *гц*

Основные данные об электрических величинах, единицах измерений и их условных обозначениях, а также наименования приборов, применяемых для измерений, сведены в таблицу 8.

§ 2. Конструкции приборов, их классификация и условные обозначения на шкалах

Электроизмерительные приборы, применяемые в сельскохозяйственных установках, по назначению могут быть разделены на две основные группы: щитовые и переносные. Щитовые приборы устанавливают на силовых щитах и щитках сельских электроустановок. Они предназначены для контроля за эксплуатацией установок. Шкала их крупная, с хорошо различимыми делениями. По форме щитовые приборы могут быть круглыми или квадратными. Последние наиболее распространены и выпускаются в большом количестве. По характеру монтажа они могут быть выступающего или утопленного типа. Выступающие приборы монтируют на лицевой части щита, а цепь к ним подводят сзади. Утопленные приборы размещают в вырезанных в щите отверстиях таким образом, что на поверхности щита остается только небольшой передний ободок прибора.

Переносные приборы могут предназначаться для технических (эксплуатационных) и лабораторных измерений. Лабораторные приборы более точные, чем технические. Поэтому они дороже и требуют бережного обращения.

Точность измерений характеризуется допустимой погрешностью измерений. Различают абсолютную погрешность измерений и относительную.

Абсолютная погрешность

$$\Delta A = A_{изм} - A_{д},$$

где $A_{изм}$ — показания прибора при измерении величины;
$A_{д}$ — действительное значение величины (может быть измерено эталонным прибором).

Относительная погрешность прибора

$$\Delta A\,\% = \frac{\Delta A}{A_{д}}\,100 = \frac{A_{изм} - A_{д}}{A_{д}}\,100.$$

Приведенная относительная погрешность прибора в процентах

$$\beta\,\% = \frac{\Delta A}{A_{н}}\,100 = \frac{A_{изм} - A_{д}}{A_{н}}\,100,$$

Классификация приборов по принципу действия

Система прибора	Условное обозначение	Род тока	Применяются для измерения	Характеристика
Магнитоэлектрическая		Постоянный	Силы тока и напряжения	Наиболее точные и чувствительные из всех остальных. Шкала равномерная
Электромагнитная		Постоянный и переменный	Силы тока, напряжения, сдвига и чередования фаз	Самые прочные и дешевые. Шкала неравномерная, начинается от 20% полной шкалы. Большая перегрузочная способность
Электродинамическая		Постоянный и переменный	Силы тока, напряжения, мощности, сдвига фаз, энергии постоянного тока	Наиболее точные приборы переменного тока. Шкала неравномерная, начинается от 10—15%
Ферродинамическая		Переменный	Силы тока, напряжения, мощности, сдвига фаз	Менее точны. Низкая чувствительность. Большое собственное потребление. Сильный вращающий момент. Используется в самописцах
Индукционная		Переменный	Электрической энергии	Сильный вращающий момент. Чувствительны к колебаниям частоты и температуры. Большая перегрузочная способность. Большое собственное потребление

Система прибора	Условное обозначение	Род тока	Применяются для измерения	Характеристика
Электростатическая		Постоянный и переменный	Напряжения	Очень большое внутреннее сопротивление. Применяют для измерения напряжения в цепях с маломощными источниками тока
Вибрационная (резонансная)		Переменный	Частоты	—
Детекторная (выпрямительная)		Переменный	Силы тока, напряжения, мощности, частоты	Низкая точность. Пригодны к измерениям в широком диапазоне частот (до 10 *кгц*)
Ламповая (электронная)		Переменный	Напряжения	Большое входное (внутреннее) сопротивление. Нечувствительны к колебаниям частоты

Таблица 10

Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

Условный знак	Значение условного знака
1,5	Класс точности прибора
	Прибор предназначен для работы в цепи постоянного тока
	Предназначен для работы в цепи переменного тока

Условный знак	Значение условного знака
	Может использоваться в цепях постоянного и переменного тока
	Предназначен для работы в цепи трехфазного тока
50Hz	Нормально работает при частоте 50 *гц*
	Правильно показывает при вертикальном положении
	Правильно показывает при горизонтальном положении
	Правильно показывает в наклонном положении (под углом 60°)
	Изоляция прибора испытана на 2 *кв*
	Предостерегающий знак высокого напряжения (знак красного цвета)
Б	Прибор предназначен для сухих неотапливаемых помещений
B_1, B_2	Для полевых и морских условий

Продолжение

Условный знак	Значение условного знака
T	Для условий тропического климата (сухого и влажного)
II	Категория защищенности от внешних магнитных полей
Обозначения зажимов на приборах:	
−	Отрицательный зажим
+	Положительный зажим
~	Зажим переменного тока
*	Общий зажим для многопредельных приборов, а также генераторный зажим для ваттметров и других приборов
⊥	Зажим, соединяемый с корпусом
⏚	Зажим (винт) для заземления

где $A_н$ — номинальное значение шкалы прибора, то есть его верхний предел измерений.

По приведенной относительной погрешности все приборы подразделяются на следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Цифра, указывающая класс точности, показывает, какую наибольшую ошибку в % от полной шкалы может дать прибор при измерениях.

В таблице 9 приведены условные обозначения систем приборов и дана их краткая характеристика.

На шкалах приборов условными знаками указывают сведения, которые необходимо знать о приборе для того, чтобы правильно его эксплуатировать (табл. 10).

По защищенности от влияния внешней среды приборы разделяются на брызгозащищенные (Бз), водозащищенные (Вз), герметические (Гм), газозащищенные (Гз), пылезащищенные (Пз), взрывобезопасные (Вб).

По устойчивости к механическим воздействиям приборы делятся на обыкновенные (ОП), тряскопрочные (ТП), вибропрочные (ВП), нечувствительные к тряске (ТН), нечувствительные к вибрации (ВН), ударопрочные (УП). Тряскопрочными, вибропрочными и ударопрочными считаются приборы, способные противостоять соответствующим механическим воздействиям и продолжать выполнять свои функции после их воздействия. Нечувствительные к тряске и вибрации способны выполнять свои функции при тряске и вибрации.

По характеру использования приборы разделяются на стационарные, переносные и транспортные (для передвижных установок).

Имеется и ряд других признаков классификации.

§ 3. Измерение напряжения и тока

В цепях переменного тока наибольшее распространение для технических измерений нашли приборы электромагнитной системы Э-30, имеющие класс точности 1,5—2,5. Для измерений в цепях постоянного тока наиболее распространены щитовые магнитоэлектрические приборы М-330, М-325 и т. д.

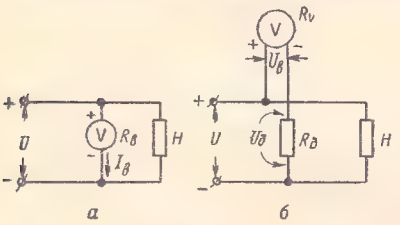


Рис. 68. Включение вольтметров постоянного тока:

а — непосредственное $U = U_в = I_в R_в$; *б* — с добавочным сопротивлением $R_д = R_в (m-1)$, где $m = \frac{U}{U_в}$; $U = U_в + U_д$; H—нагрузка.

Вольтметры включают в сеть или непосредственно (рис. 68,*а* и 69,*а*), или с добавочным сопротивлением $R_д$ (рис. 68,*б* и 69,*б*), или с помощью измерительных трансформаторов напряжения *ТН* (рис. 69, *в*).

Амперметры могут быть включены или непосредственно, или с шунтами (при измерении постоянного тока), или через измерительные трансформаторы тока (при изме-

рении переменного тока). Схемы включения амперметров представлены на рисунках 70 и 71.

Электроизмерительные щитовые приборы — миллиамперметры, амперметры, килоамперметры, вольтметры и

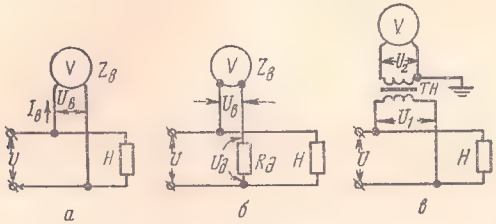


Рис. 69. Включение вольтметров переменного тока:

а — непосредственное $U=U_в=I_в Z_в$; *б* — с добавочным сопротивлением $U=U_в+U_д$; *в* — через измерительный трансформатор TH, $U=U_1$;

$$U=\kappa_{тн}U_в=U_2;\ k_{тн}=\frac{U_1}{U_2}.$$

киловольтметры — как для постоянного, так и для переменного тока имеют шкалы с непосредственным отсчетом измеряемых величин. Они подразделяются на миниатюрные, малогабаритные и большого габарита. При монтаже

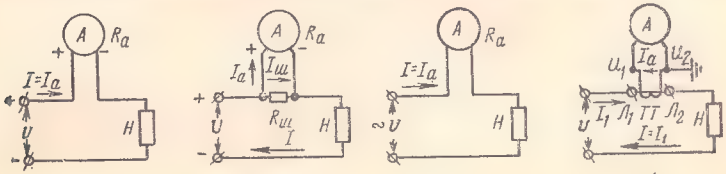


Рис. 70. Включение амперметров постоянного тока (магнитоэлектрической системы):

а — непосредственное; *б* — через шунт;

$$I=I_ш+I_a;\ R_ш=\frac{R_a}{n-1};\ n=\frac{I}{I_a}.$$

Рис. 71. Включение амперметров переменного тока:

а — непосредственное; *б* — через трансформатор тока TT, $I_1=I=k_{тт}I_a$;

$$\kappa_{тт}=\frac{I_1}{I_2};\ I_2=I_a.$$

их рекомендуется устанавливать на высоте от 1,2 до 2,2 *м* (при большой точности шкалы —1,7 *м*).

Приборы выполняют однопредельными и двухпредельными. В последнем случае предел измерения изменяют переключателем или кнопкой, установленными на приборе.

Щитовые приборы типа М-330 постоянного тока выпускаются со следующими шкалами (верхний предел измерений): миллиамперметры — 1; 3; 5, 10; 15; 30; 50; 75; 100; 150; 300; 500 *ма*; амперметры—1; 2; 3; 5; 10; 20; 30; 50 *а* с непосредственным включением и 75; 100; 150; 200; 300; 500; 750 *а* с наружным шунтом на 75 *мв* типа 75ШС; килоамперметры —1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6 *ка* с наружным шунтом 75ШС; вольтметры — 3; 7,5; 15; 30; 50; 75; 150; 250; 300; 400; 500; 600 *в* с непосредственным включением; киловольтметры—1; 1,5; 3 *кв* с отдельным добавочным сопротивлением Р103.

Щитовые приборы типа Э-330 переменного тока изготавливают со следующими шкалами (верхний предел измерений): амперметры —5; 10; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200 *а* с непосредственным включением и 5; 10; 20; 30; 50; 75;100; 150; 200; 300; 400; 600; 750 *а* с включением через трансформаторы тока; вольтметры — 15; 30; 50; 150; 250; 500; 600; 1000 *в* с непосредственным включением и 500, 1000 *в* через трансформаторы напряжения; киловольтметры —4; 7,5; 12,5; 20; 40 *кв* с трансформаторами напряжения.

Другие типы приборов могут иметь несколько отличную шкалу верхних пределов измерения.

Из лабораторных приборов, применяемых для научно-исследовательских измерений, наиболее широкое применение находят комплекты приборов КИП, КПМ и др. Комплект электроизмерительных приборов КИП размещен в чемодане весом около 15 *кг*. В комплект входят астатические вольтметры, амперметры, ваттметры класса точности 0,5, трансформаторы тока и добавочные сопротивления. КПМ содержит комплект малогабаритных электроизмерительных приборов класса точности 1,0.

Приборы электромагнитной системы, нашедшие наибольшее применение для технических измерений, используются для измерений как в цепях переменного, так и постоянного тока. Принцип действия прибора электромагнитной системы основан на свойстве катушки *А* (рис. 72), включенной в цепь тока, втягивать стальной якорь — сердечник, который выполняется в виде стального листочка *Б*, связанного со стрелкой *С*. Угол отклонения стрелки, а следовательно, и показания прибора зависят от величины измеряемого тока или напряжения.

Катушка вольтметра обычно имеет большое число витков, она выполнена тонким изолированным проводом.

Чтобы увеличить внутреннее сопротивление прибора, последовательно с катушкой включено добавочное сопротивление, встроенное в его корпус. Вольтметры предназначаются для измерения напряжения между фазами сети на клеммах электроприбора, их включают параллельно источнику тока или электроприбору.

Амперметр, который предназначен для измерения силы тока в электрической цепи, включают последовательно

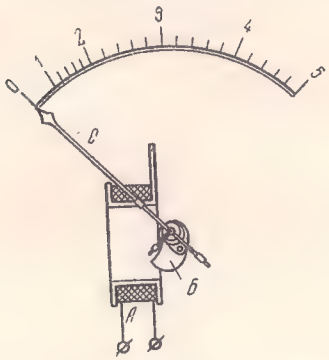


Рис. 72. Прибор электромагнитной системы:
А — катушка; *Б* — стальной листок; *С* — стрелка прибора.

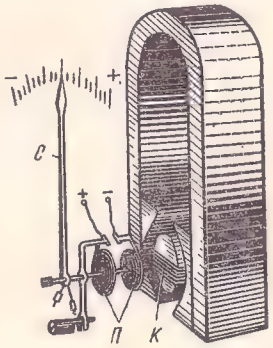


Рис. 73. Магнитоэлектрический прибор:
К — катушка прибора; *П* — токоподводящие пружины; *С* — стрелка.

с токоприемником. Поэтому обмотку амперметра выполняют более толстым проводом с малым внутренним сопротивлением. Нельзя включать амперметр параллельно источнику тока! Прибор может выйти из строя или из-за перегорания обмотки, или от повреждения стрелки при сильном отклонении за шкалу.

Вольтметры и амперметры магнитоэлектрической системы можно использовать только в сетях постоянного тока. Принцип их устройства показан на рисунке 73. Постоянный магнит создает постоянное магнитное поле, в котором находится катушка, связанная со стрелкой прибора. При включении катушки *К* в цепь постоянного тока вокруг нее образуется магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита и вызывает отклонение стрелки вправо или влево, в зависимости от направления тока в катушке. При вклю-

чении такого прибора в цепь переменного тока стрелка C не успевает следовать за изменением направления тока. Она вибрирует около нуля. При этом прибор может выйти из строя из-за перегорания обмотки, так как величина тока не может быть определена.

Приборы детекторной системы, представляющие собой комбинацию магнитоэлектрического прибора и выпрямителя, могут применяться для измерения в цепях переменного и постоянного тока до частоты 10 *кгц*.

Приборы термоэлектрической системы представляют собой комбинацию весьма чувствительного магнитоэлектрического прибора и термопары, которая реагирует на степень нагрева элемента, проводящего ток, и вызывает отклонение стрелки магнитоэлектрического прибора.

§ 4. Измерение мощности

Непосредственно мощность измеряют ваттметрами. Механизм ваттметра электродинамической системы имеет две катушки — подвижную и неподвижную. Одна из них включена параллельно нагрузке, другая — последовательно с ней. Прибор имеет четыре зажима — от каждой катушки по два. Чтобы правильно включить прибор, конец последовательной (токовой) обмотки прибора, который должен быть соединен с цепью со стороны источника тока, обозначают звездочкой. Звездочкой также обозначают конец параллельной обмотки (обмотки напряжения), который должен быть соединен с токовой обмоткой (рис. 74).

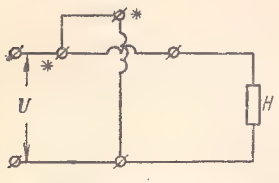


Рис. 74. Схема включения ваттметра:
Н — нагрузка.

Ваттметр показывает только активную мощность, потребляемую нагрузкой, независимо от величины общего тока, который определяется и активной и реактивной нагрузками. Рассмотрим возможные случаи нагрузки.

1. Чисто активная нагрузка — в цепь переменного тока включено активное сопротивление R (рис. 75,*а*). Вектор тока нагрузки совпадает по фазе с вектором напряжения источника. Коэффициент мощности равен единице ($\cos \varphi = 1$). Ваттметр показывает величину P, амперметр — величину I, вольтметр — величину U. При этом

$$P = UI\cos\varphi = UI \text{ вт.}$$

2. Чисто индуктивная нагрузка (идеальный случай) — в цепь переменного тока включено лишь индуктивное сопротивление X_L (рис. 75,*б*). Вектор тока нагрузки отстает от вектора напряжения источника на угол 90°, то есть $\cos\varphi = \cos 90° = 0$. Ваттметр показывает нуль: $P = UI\cos\varphi = UI0 = 0$. Произведение показаний вольтметра U и показаний амперметра I дает реактивную мощность Q_L:

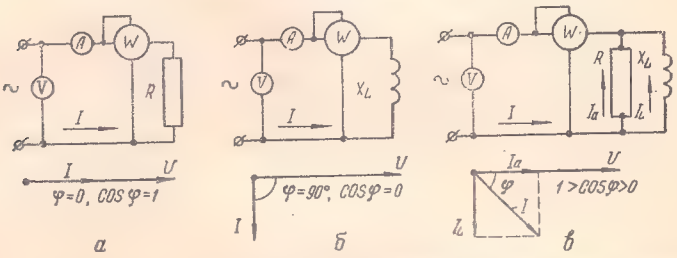


Рис. 75. Измерение мощности в схемах с различным характером нагрузки:

а — активная нагрузка; *б* — индуктивная нагрузка; *в* — смешанная активно-индуктивная нагрузка.

$$Q_L = UI \text{ вар.}$$

3. Смешанная нагрузка — в цепь включено активное R и индуктивное X_L сопротивления (рис. 75, *в*). Общий ток I представляет геометрическую сумму активного I_a и индуктивного I_L токов. Cos φ больше нуля, но меньше единицы. Ваттметр покажет величину $P = UI\cos\varphi = UI_a$. Произведение показаний вольтметра на показания амперметра даст величину полной мощности S:

$$S = UI \text{ ва.}$$

Реактивная мощность может быть подсчитана как $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$.

Случай 3 является наиболее характерным для практики, так как активный и индуктивный ток потребляется всеми токоприемниками, имеющими магнитные поля: электрическими двигателями, трансформаторами, генераторами и т. д.

§ 5. Астатические приборы

Система электродинамических приборов не содержит стальных сердечников, поэтому магнитное поле у них слабое, и они в значительной мере подвержены влиянию внешних магнитных полей и дают при этом искаженные показания.

Приборы электромагнитной системы также дают погрешность измерения при воздействии на них внешних магнитных полей.

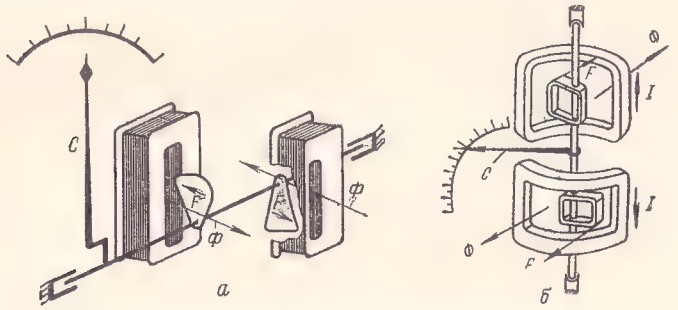


Рис. 76. Устройство астатического прибора:
а — электромагнитной системы; *б* — электродинамической системы; *Ф* — магнитные потоки катушек; *F* — вращающие моменты; *С* — стрелки приборов.

Для уменьшения влияния внешних магнитных полей приборы экранируют — измерительную систему помещают в кожухи из стали или применяют механизмы астатического устройства (АСТ). Такие приборы предназначаются для точных лабораторных измерений.

На рисунке 76 показано устройство астатического механизма электромагнитной *(а)* и электродинамической *(б)* систем. По сути дела здесь имеются два измерительных механизма, воздействующих на общую ось. Катушки включены так, что их магнитные поля направлены в разные стороны, но вращающие моменты, действующие на стрелку, направлены в одну сторону. В таком приборе при воздействии внешнего магнитного поля поле одной катушки будет усиливаться, а поле второй катушки — ослабляться. Результирующее действие внешнего магнитного поля будет равно нулю.

§ 6. Электрические счетчики и их включение

Учет электроэнергии подразделяется на коммерческий и технический, или контрольный. Коммерческий учет предназначен для денежных расчетов за электроэнергию. Счетчики при этом называются расчетными. На винтах, крепящих кожух расчетного счетчика к корпусу, должна быть пломба с клеймом, указывающим срок поверки счетчика. На крышке колодки зажимов счетчик должен иметь пломбу электроснабжающей организации. Расчетные счетчики, предназначенные для прямого включения в сеть, могут быть класса точности 2,0. Расчетные счетчики, включаемые с измерительными трансформаторами, должны быть класса точности не ниже 1,0. Трансформаторы тока для расчетных счетчиков должны быть класса точности 0,5.

Счетчики, используемые для внутреннего контроля, называют контрольными.

Все счетчики необходимо периодически проверять, ставя на них клеймо с датой поверки. Этим занимаются органы Комитета по делам мер и измерительных приборов. Сроки государственной поверки следующие: для счетчиков с номинальной мощностью до 5 *квт*, в том числе

Таблица 11

Счетчики активной и реактивной энергии

Тип	Наименование и краткая характеристика
СО2-М	Счетчик активной энергии, однофазный, непосредственного включения, выпускается на 5 *а*, 127 и 220 *в*.
СА3У-И670	Счетчик активной энергии, трехфазный трехпроводный, универсальный, для непосредственного включения и с трансформаторами тока (5 *а*, 127, 220 и 380 *в*) и для включения через измерительные трансформаторы тока и напряжения (5 *а*, 100 *в*)
СА4У-И672	Для трехфазных четырехпроводных сетей на 5 *а*, 220 и 380 *в*
СР4У-И673	Счетчик реактивной энергии, трехфазный, для трех- и четырехпроводной системы, универсальный, на 5 *а*, 100, 127, 220, 380 *в*

и бытовых,—раз в 5 лет; для счетчиков с номинальной мощностью свыше 5 *квт* — раз в 2 года.

Промышленность выпускает следующие счетчики активной и реактивной энергии (табл. 11).

Устройство счетчика представлено на рисунке 77,*а*. Счетчик имеет две обмотки — параллельную *ОН*, вклю-

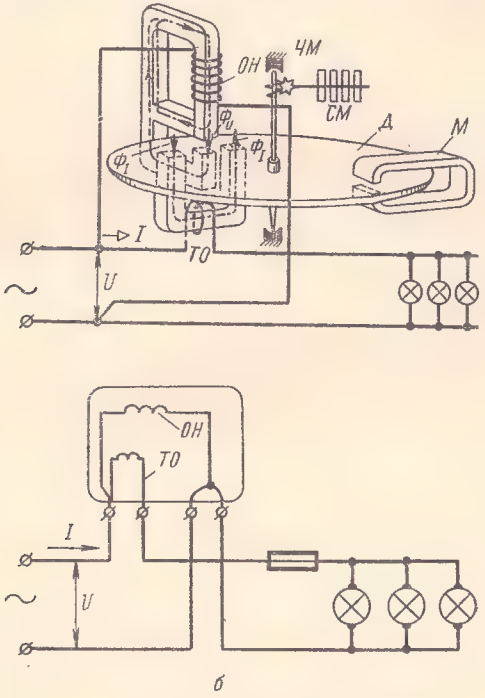


Рис. 77. Схема устройства (*а*) индуктивного счетчика и его включения (*б*):

ТО — токовая обмотка; *ОН* — обмотка напряжения; *Д* — диск алюминиевый; *ЧМ* — червячный механизм; *СМ*— счетный механизм; *М* — магнит для притормаживания диска.

ченную на напряжение сети, и последовательную *ТО*, через которую протекает ток, потребляемый электроприборами.

Магнитные потоки *Ф* от последовательной и параллельной обмоток пересекают край алюминиевого диска *Д*, в котором наводятся местные вихревые токи, порождаю-

щие в нем магнитные поля. Последние, взаимодействуя с основными магнитными потоками, приводят диск во вращение. Обороты диска регистрируются счетным механизмом *СМ*, который дает отсчет в гектоватт-часах или в киловатт-часах. Магнит *М* предназначен для торможения диска при выключенной нагрузке. Диск пересекает магнитное поле постоянного магнита, и вокруг места пересечения диска магнитными линиями возникает вихревой ток, порождающий магнитный поток, который, взаимодействуя с полем магнита, препятствует вращению диска.

На шкале счетчика обычно указаны его тип, напряжение, на которое он рассчитан, величина номинального тока и постоянная счетчика. Счетчики выпускают в основном на ток 5 *а* и напряжение 127, 220 и 380 *в* для включения непосредственного или только с трансформаторами тока, а также на 100 *в* для включения с трансформаторами напряжения и тока. Для непосредственного включения предназначены счетчики, выпускаемые на ток 10, 20, 50 *а* и напряжение 127, 220 и 380 *в*.

Постоянная счетчика, приводимая на его шкале, показывает, сколько оборотов счетчика соответствует 1 киловатт-часу. Показания счетчика снимают обычно 1—2 раза в месяц. Расход энергии за месяц равен разнице двух показаний счетчика.

В практике эксплуатации электроустановок счетчиками, включенными для измерения электрической энергии, пользуются для определения мощности включенной нагрузки.

Есть два способа измерения мощности по счетчику.

Первый способ. Списывают начальные показания счетчика W_1, включают нагрузку на время *tч*. Списывают конечные показания счетчика W_2. Среднюю мощность определяют так:

$$P_{ср} = \frac{W}{t} = \frac{W_2 - W_1}{t} \left[\frac{квт \cdot ч}{ч} = квт\right]. \qquad (152)$$

Этот способ дает значение некоторой средней мощности за время *t*.

Второй способ. Пользуясь секундомером, записывают время *t* в *сек*, в течение которого диск совершит *n* оборотов. Зная постоянную счетчика *c*, число оборотов диска, соответствующее 1 *квт·ч*, определяют мощность по формуле

$$P = \frac{3600 \cdot n}{ct} \text{ квт.} \qquad (153)$$

Если счетчик включен с трансформатором тока, то формулу (153) записывают так:

$$P = \frac{3600 \cdot n}{ct} k \text{ квт,} \qquad (154)$$

где k — коэффициент трансформации трансформатора тока.

Пример 1. Постоянная счетчика $c=2500$; диск счетчика делает 5 оборотов за 10 *сек*. Определить включенную мощность.

По формуле (153)

$$P = \frac{3600 \cdot 5}{2500 \cdot 10} = 0{,}72 \text{ квт.}$$

Пример 2. Постоянная счетчика 1800. Счетчик включен с трансформатором тока, имеющим коэффициент трансформации $k=50/5$. Диск делает 10 оборотов в 50 *сек*.

Включенная мощность

$$P = \frac{3600 \cdot 10}{1800 \cdot 50} \cdot 50/5 = 4 \text{ квт.}$$

§ 7. Расширение пределов измерения счетчиков

Счетчики в основном выпускают на ток 5 *а*.

Для расширения пределов измерения счетчика по току используют трансформаторы тока. Трансформаторы тока выпускают на следующие величины токов: 10/5*а*, 15/5*а*, 20/5*а*, 30/5*а*, 40/5*а*, 50/5*а*, 60/5*а*, 75/5*а*, 100/5*а* и т. д. Соответственно коэффициенты трансформации равны 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20 и т. д.

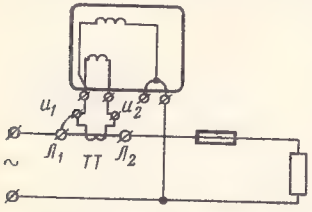


Рис. 78. Схема включения счетчика СО2 с трансформатором тока $ТТ$:

$Л_1$ и $Л_2$ — контакты первичной обмотки трансформатора, включаемой в линию; U_1 и U_2 — контакты вторичной обмотки трансформатора для подключения измерительных приборов.

Цифра в числителе указывает номинальный ток первичной обмотки, включаемой последовательно с потребителем тока. Цифра в знаменателе указывает номинальный вторичный ток, равный номинальному току счетчика.

На рисунке 78 приведена электрическая схема включения счетчика с трансформатором тока $ТТ$. Расход энергии W определяется как показание счетчика $W_{сч}$, умноженное

на коэффициент трансформации k трансформатора тока, то есть $W = kW_{сч}$.

При измерении энергии, потребляемой в трехфазной трехпроводной цепи, используют два счетчика, включаемые по схеме, указанной на рисунке 79, *а*. Общий расход энергии в этом случае равен сумме показаний обоих счетчиков. При очень низком $\cos\varphi$ диск одного из счетчиков может вращаться в обратную сторону. Два однофазных счетчика могут быть заменены одним трехфазным трехпроводным счетчиком типа СА3 (рис. 79,*б*). Он скомбинирован из двух однофазных счетчиков, диски которых насажены на общую ось и работают на один счетный механизм.

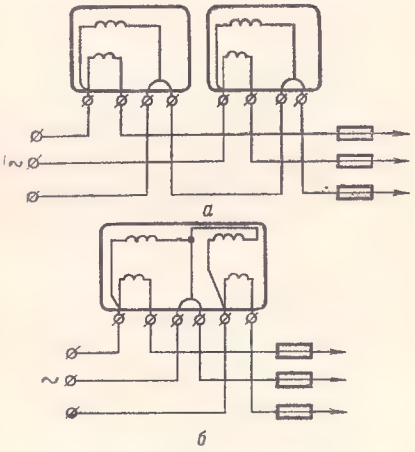


Рис. 79. Схема включения двух однофазных счетчиков типа СО2 (*а*) и эквивалентного им одного трехфазного типа СА3 (*б*).

Для измерения электрической энергии в трехфазных четырехпроводных сетях (рис. 80,*а*) используют три однофазных счетчика или один комбинированный (рис. 80,*б*), состоящий из трех однофазных, диски которых сидят на одной общей оси и работают на общий счетный механизм.

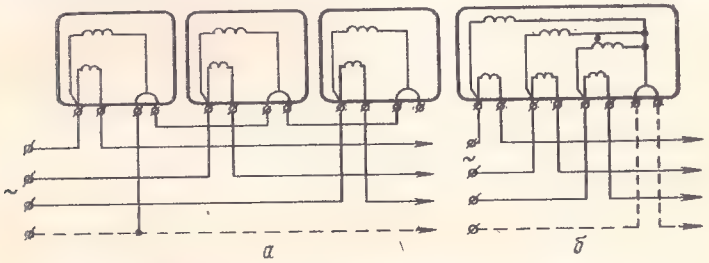


Рис. 80. Схема включения трех однофазных счетчиков (*а*) и эквивалентного им четырехпроводного типа СА4 (*б*).

Общая энергия, измеренная в этом случае, равна сумме показаний трех счетчиков:

$$W_{об} = W_1 + W_2 + W_3.$$

Если все три счетчика включены с трансформаторами тока, имеющими одинаковый коэффициент трансформации k, то общий расход энергии

$$W_{об} = (W_1 + W_2 + W_3)\, k.$$

Пример 1. Показания трех счетчиков на 1 февраля: первого — 845 *квт·ч*, второго — 590 *квт·ч*, третьего — 905 *квт·ч*; показания на 1 марта: первого — 890 *квт·ч*, второго 620 *квт·ч*, третьего — 940 *квт·ч*. Счетчики включены с трансформаторами тока 50/5. Определить расход энергии за февраль.

1-й	счетчик зарегистрировал:	890—845=45	*квт·ч*
2-й	»	620—590=30	*квт·ч*
3-й	»	940—905=35	*квт·ч*
	В сумме	110	*квт·ч*

Общий расход с учетом коэффициента трансформации

$$W_{об} = (W_1 + W_2 + W_3)\, k = 110 \cdot 50/5 = 1100 \text{ квт·ч}.$$

При включении счетчиков в высоковольтную сеть, кроме трансформаторов тока, используют и трансформа-

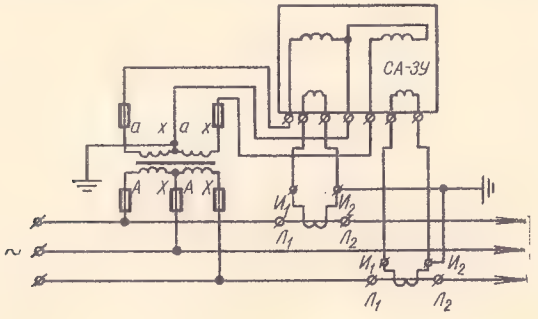


Рис. 81. Схема включения трехфазного счетчика типа СА3У в сеть высокого напряжения.

торы напряжения. Схема включения трехфазного счетчика типа СА3У в сеть высокого напряжения представлена на рисунке 81. Для включения измерительных приборов на трансформатор напряжения желательно использовать

два однофазных трансформатора напряжения, соединенных в открытый треугольник; для защиты обслуживающего персонала и включенных во вторичную цепь приборов от высоких потенциалов, которые могут появиться на вторичной стороне в случае пробоя изоляции, вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения нужно заземлять.

Электроснабжающие организации ведут также учет и реактивной мощности. Для этой цели применяют счетчики реактивной энергии. На рисунке 82 представлена схема включения трехфазного счетчика реактивной энергии.

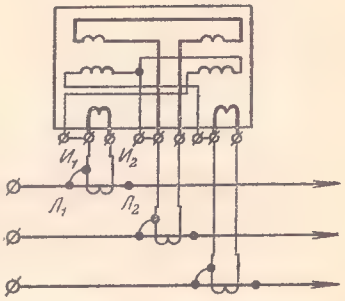


Рис. 82. Схема включения трехфазного счетчика реактивной энергии в сеть 220/380 *в*.

§ 8. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы * служат для изолирования измерительных приборов и аппаратов, с которыми возможно соприкосновение людей при эксплуатации электроустановки, от цепей высокого напряжения. Трансформаторы тока применяют также для расширения пределов измерения счетчиков, амперметров и других приборов в установках низкого напряжения с большими токами. Большинство этих приборов рассчитано на ток не более 5 *а*. При измерении токов, превышающих 5 *а*, используют трансформаторы тока, первичную цепь которых, как уже было показано на схемах, включают в рассечку силовой цепи, а приборы включают во вторичную цепь. Шкалы приборов при этом градуируют с учетом коэффициента трансформации.

В практике эксплуатации сельских электроустановок широкое применение нашли катушечные трансформаторы тока типа ТК-20 и ТК-40 для сетей с напряжением до 0,66 *кв*, а также трансформаторы новой серии ТКЛ-3 (катушечные с литой изоляцией для установок до 3 *кв*). Их изготавливают на номинальные первичные токи по стандартной шкале от 5 до 1000 *а*. Номинальный вторичный

*Силовые трансформаторы рассматриваются в гл. IX.

ток их 5 *а*, класс точности 0,5 и 1,0, номинальная вторичная мощность 10 *ва*, номинальная вторичная нагрузка 0,4 *ом* (у ТК-20 0,2 *ом*). В обозначении трансформатора указаны основные его параметры.

Трансформаторы тока типа ТНШЛ-0,66 предназначены для установки на шинах, они имеют литую изоляцию, их выпускают со шкалой токов от 300/5 до 15 000/5 *а*.

Трансформаторы тока ТШ — шинноподвесные и опорные — выпускаются со шкалой токов от 300/5 до 1000/5 *а*, на 0,66 *кв* и т. д.

В установках высокого напряжения (6—10 *кв*) наибольшее распространение получили трансформаторы тока ТПФ (трансформатор тока проходной фарфоровый).

Особенностью эксплуатации трансформаторов тока является необходимость замыкать вторичную обмотку через обмотки измерительных приборов или замыкать накоротко, если измерительные приборы отсутствуют. Большую опасность представляет обрыв вторичной обмотки. Ток первичной обмотки не зависит от нагрузки во вторичной обмотке и целиком определяется нагрузкой главной цепи. Поэтому первичная обмотка имеет намагничивающую силу с полными ампер-витками и при разомкнутой вторичной обмотке. При нормальном — замкнутом — состоянии вторичная обмотка создает размагничивающие ампер-витки. При разомкнутой же обмотке размагничивающие ампер-витки отсутствуют, а первичные ампер-витки создают очень большой магнитный поток, который наводит во вторичной, разомкнутой, обмотке напряжение до 15 *кв*, опасное для изоляции приборов и обслуживающего персонала. Поэтому, если приборы отключены, вторичная цепь трансформаторов тока должна быть замкнута.

Измерительные трансформаторы напряжения используют для понижения напряжения при питании устройств релейной защиты и автоматики, измерительных приборов и установок контроля изоляции.

Вторичное номинальное напряжение у трансформаторов напряжения в соответствии с ГОСТ равно 100 *в*. Каждый из трансформаторов имеет предельно допустимую мощность включаемых во вторичную обмотку приборов. При превышении мощности вторичной нагрузки нарушается коэффициент трансформации и приборы (вольтметры или счетчики) будут давать неверные показания. Выпускают эти трансформаторы четырех классов точности:

для точных измерений — 0,2, для включения расчетных счетчиков — 0,5, для обычных измерений мощности и энергии — 1,0, для вольтметров и реле — 3,0.

Схема включения трансформатора напряжения приведена на рисунке 83. Трансформатор напряжения *1* включается в сеть высокого напряжения через разъединители *4*, добавочные токоограничивающие сопротивления и предохранители *5*. Со стороны низковольтной обмотки *3* устанавливают предохранители *6* для защиты трансформатора от коротких замыканий во вторичных цепях и приборах.

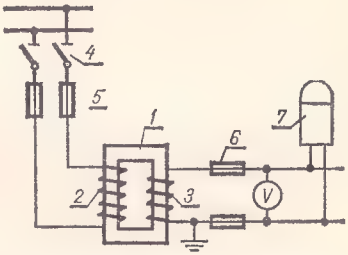


Рис. 83. Схема включения трансформатора напряжения:
1 — трансформатор; *2* — высоковольтная обмотка; *3* — обмотка 100 *в*; *4* — разъединители; *5* — предохранители высоковольтные токоограничивающие; *6* — предохранители низковольтные; *7* — реле напряжения.

Для контрольных измерений токов в цепях высокого напряжения используют трансформатор тока с разъемным сердечником (измерительные клещи). Первичной обмоткой в этом случае служит токоведущая часть распределительного устройства, охватываемая разъемным сердечником (рис. 84). На этом сердечнике расположена вторичная обмотка, в которую включен амперметр.

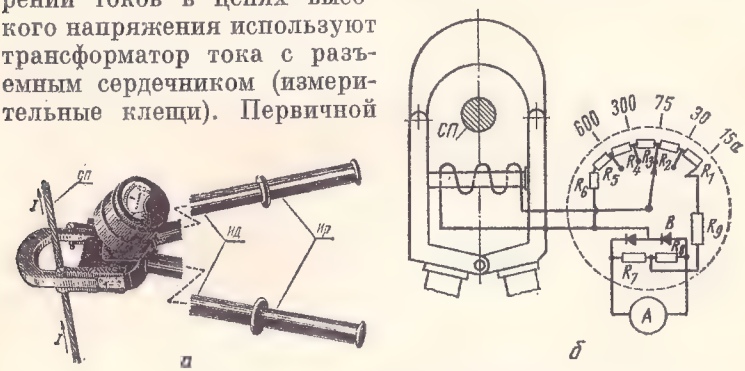


Рис. 84. Измерительные клещи:
а — общий вид; *б* — схема соединений; *СП* — силовой провод (до 10 *кв*); *ИД* — изолирующие держатели; *ИР* — изолирующие ручки; *В* — выпрямители.

Трансформаторы напряжения применяют для контроля изоляции высоковольтных установок. Этот

контроль заключается в измерении напряжения между каждой фазой установки и землей. Если изоляция одной из фаз (*B*) повреждена, то показания вольтметров меняются (рис. 85, *а*). Для контроля за состоянием изоляции используют три однофазных трансформатора напряжения, включаемых в звезду (рис. 85, *а*). Нулевую точку заземляют. Нейтральную точку вторичных обмоток также заземляют для защиты при пробоях изоляции между обмотками высокого и низкого напряжения. Если одна из фаз в линии замыкает на землю, обмотка трансформатора,

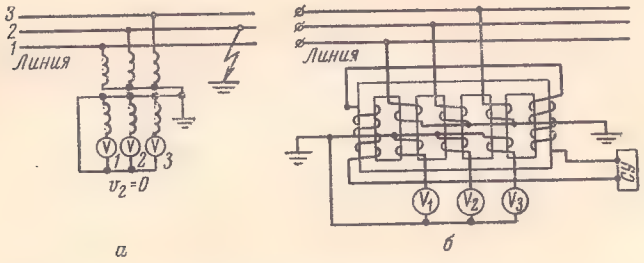


Рис. 85. Контроль изоляции:

а — с помощью трех однофазных трансформаторов напряжения; *б*—с помощью пятистержневого трансформатора напряжения для высоковольтной сети; *СУ* — сигнализирующее устройство.

включенного в эту фазу, закорачивается. Вольтметр, включенный во вторичную обмотку трансформатора, не показывает напряжения (полное замыкание на землю). В то же время напряжения здоровых фаз по отношению к земле увеличиваются до полных линейных напряжений, то есть в 1,73 раза.

Для контроля изоляции изготавливают также пятистержневые трансформаторы напряжения (рис. 85, *б*). Назначение двух крайних стержней заключается в том, чтобы дать возможность магнитному потоку от того тока, который возникает при замыкании на землю в линии, замкнуться через магнитопровод, образуемый двумя крайними сердечниками. На эти стержни наложена дополнительная обмотка, в которой при замыкании линии на землю появляется напряжение. Обмотка питает сигнальные устройства и реле защиты от замыканий на землю.

В сельских электроустановках используются трансформаторы напряжения с первичными напряжениями 380, 6000, 10 000, 35 000 *в* и вторичными 100 *в*.

Однофазные трансформаторы типа НОС-0,5 с воздушным охлаждением применяются в установках низкого напряжения и трансформируют напряжение 380 *в* на 100 *в*. Трансформаторы типа НОМ-6 на напряжения 6000/100 *в* применяются в высоковольтных устройствах напряжением 6 *кв*. НОМ-10 — трансформатор напряжения, однофазный, с масляным охлаждением, на 10 *кв*.

Трансформаторы типа НТМК-6 и НТМК-10— трехфазные, трехстержневые, соответственно на 6 и 10 *кв*. Трансформаторы НТМИ-6 и НТМИ-10 — пятистержневые.

Трансформаторы тока и напряжения выбирают по номинальному напряжению установки, номинальному первичному току, классу точности, номинальной вторичной мощности и по типу. Обычно номинальный вторичный ток равен 5 *а*. Для точных лабораторных измерений используют трансформаторы тока класса точности 0,1 (тип И-56, вес 85 *кг*), класса точности 0,2 (тип И-54, вес 4 *кг*, а также УТТ-5 и УТТ-6).

Из лабораторных трансформаторов напряжения распространены УТН-1 на первичные напряжения до 300 *в* и Н-50 на первичные напряжения 3000, 6000, 10 000 и 15 000 *в*. Класс точности их 0,2.

§ 9. Измерительные приборы — логометры

В последние годы широкое распространение получили приборы магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем со сдвоенными измерительными механизмами без использования противодействующих пружин. Такие приборы часто называют приборами без противодействующего момента. В них измеряется соотношение токов в обмотках, и называют их логометрами (рис. 86).

Магнитоэлектрические логометры применяются в приборах для измерения больших сопротивлений. Электромагнитные логометры используются в приборах для измерения емкостей, частоты, коэффициента мощности и угла сдвига фаз.

Стрелка указателя логометра, не имея противодействующей пружины, которая в обычных приборах возвращает

стрелку на нулевое деление, обычно может занимать любое положение относительно шкалы при отключенном приборе. При включении прибора токи обтекают катушки, создается вращающий момент и стрелка отклоняется в соответствии с возникшим моментом.

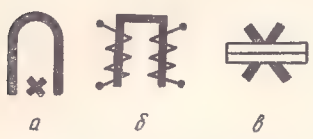


Рис. 86. Условные обозначения приборов без противодействующего момента (логометров):
а — магнитоэлектрическая система; *б* — электромагнитная; *в* — электродинамическая.

Для измерения cos φ применяют однофазные и трехфазные фазометры, которые выполняют как логометры электромагнитной и электродинамической систем. Приборы имеют двухсторонний отсчет с нулевым положением посредине.

Для измерения частоты, кроме частотомеров вибрационной системы, применяются частотомеры ферродинамической системы, работающие по принципу логометра.

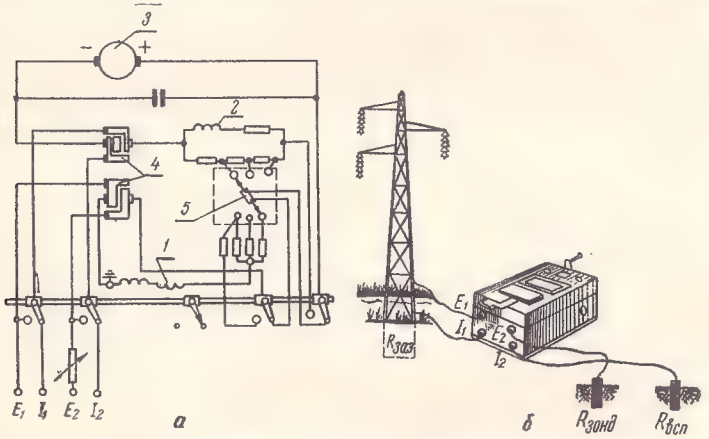


Рис. 87. Измеритель заземлений МС-0,7:
а — принципиальная схема; *б* — схема включения; *1* и *2* — рамки измерительного прибора; *3* — генератор постоянного тока; *4* — механические прерыватели и выпрямители тока (коммутаторы) в цепи заземления и прибора; *5* — переключатель пределов измерения.

По принципу логометра действует и измеритель заземлений МС-0,7, используемый для измерения сопротивления растеканию тока заземлителей. Магнитоэлектрический логометр имеет две рамки с катушками *1* и *2* (рис. 87, *а*). Внутри прибора помещается генератор по-

стоянного тока *3*. С помощью одного из механических прерывателей — коммутаторов *4*, работающих синхронно, ток генератора превращается в прерывистый переменный, ибо постоянным током нельзя измерять сопротивления заземлителей вследствие явления поляризации между заземлителем и почвой. Через систему, состоящую из испытуемого заземлителя и двух дополнительных (соответственно $R_{заз}$, $R_{зонд}$, $R_{всп}$ на рисунке 87, *б*), протекают переменные токи, которые, возвращаясь на приборы, выпрямляются вторым коммутатором. Соотношения между токами в последовательной и параллельной обмотках зависят от сопротивления $R_{заз}$.

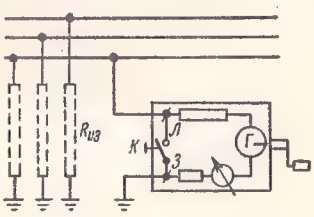


Рис. 88. Схема включения мегомметра для измерения сопротивления изоляций:
Г — генератор постоянного тока; *К* — кнопка, замыкающая цепь генератора; *Л* — зажим для подключения линии (обмотки аппарата); *З* — зажим, соединяемый с землей.

Сопротивление изоляции электрических установок измеряют мегомметрами. Мегомметр типа М1101М представляет собой комбинацию генератора постоянного тока и логометра. Для измерения сопротивления изоляции в линии (рис. 88) прибор подключают к линии и при нажатой кнопке *К* добиваются необходимой скорости вращения генератора *Г*. Стрелка прибора должна установиться при этом на нуле. Отпуская кнопку и продолжая вращать генератор с той же скоростью, замеряют сопротивление изоляции. При исправной изоляции линии прибор покажет не менее 1000 *ом* на 1 *в* напряжения в сети. Если прибор показывает меньшее значение сопротивления, значит, изоляция сети по отношению к земле повреждена.

§ 10. Приборы для измерения активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей с использованием мостовых схем

В практике электрических измерений сопротивлений, индуктивностей и емкостей широкое применение нашли измерительные приборы, построенные по принципу мостовых схем. На рисунке 89 приведена принципиальная схема малогабаритного мостового прибора постоянного

тока для измерения сопротивлений в пределах от 0,05 до 50 000 *ом* (тип прибора ММВ). Прибор имеет пять пределов измерения. В зависимости от положения переключателя показания прибора по шкале умножаются соответственно на 0,1, 1, 10, 100 и 1000 *ом*. Для питания моста используется батарейка карманного фонарика на 4—4,5 *в*. Измеряемое сопротивление подключают к клеммам R_x. С помощью лимба переменного сопротивления *Л*, имеющего деления, соответствующие измеряемому сопротивлению, стрелку индикаторного гальванометра *Г* устанавливают на нулевое деление. По делению на лимбе, остановившемуся против указателя на крышке прибора, определяют величину измеряемого сопротивления.

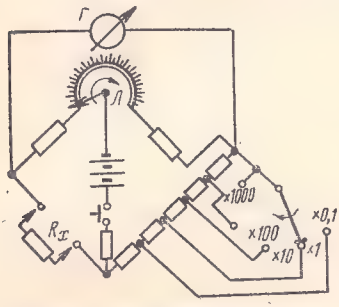


Рис. 89. Схема измерительного моста типа ММВ:

Г — гальванометр (индикатор); *Л* — переменное сопротивление с лимбом и шкалой для отсчета величины сопротивления.

Для измерения сопротивлений, индуктивностей и емкостей применяют универсальные мосты. В плечи мостов включают сопротивления, индуктивности и емкости. Источником питания в этих мостах служит переменный ток промышленной частоты или переменный ток, генерируемый специальным устройством внутри прибора.

§ 11. Регистрирующие приборы и осциллографы

При помощи самопишущих приборов (самописцев) исследуют изменения измеряемой электрической величины во времени. Самопишущие гальванометры, вольтметры, амперметры, ваттметры, частотомеры записывают соответствующие величины на бумаге, движущейся с определенной скоростью. Для записи на стрелке прибора укрепляют специальное перо с запасом чернил. Для записи быстропротекающих процессов с частотой до 5000 *гц* используют магнитоэлектрические (вибраторные) осциллографы. Характер изменения процесса записывают на светочувствительную бумагу или пленку. Для изучения процессов, протекающих с большей частотой, применяют электронные

осциллографы. Электронный луч рисует кривую процесса на экране специальной трубки осциллографа. Для фотографирования кривой с экрана используют специальные приставки с фотоаппаратом.

Глава IX

Силовые трансформаторы

§ 1. Принцип действия и устройство трансформатора

Трансформаторы используют для повышения и понижения напряжения в сетях переменного тока. Первый в мире трансформатор был создан русским изобретателем П. Н. Яблочковым. В 1876 г. он впервые высказал идею о возможности трансформации переменного тока, а в 1885 г. предложил передавать электроэнергию на значительные расстояния, используя для этой цели высокое напряжение переменного тока.

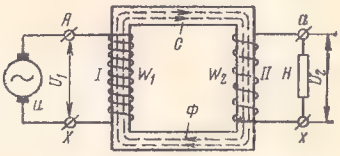


Рис. 90. Схема однофазного трансформатора:
И — источник энергии (генератор); *С* — стальной сердечник; *I* и *II* — первичная и вторичная обмотки; *Н* — нагрузка.

Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной взаимоиндукции. Трансформатор представляет собой устройство, у которого на сердечник, собранный из электротехнической стали, намотаны две обмотки (рис. 90). Одна из них — первичная — подключена к источнику энергии, к другой — вторичной — подключен потребитель. Ток, протекающий в первичной обмотке от источника энергии, создает в сердечнике переменный магнитный поток Φ, который во вторичной обмотке индуктирует электродвижущую силу. Для любого трансформатора отношение напряжений в первичной U_1 и во вторичной U_2 обмотках при холостом ходе приблизительно равно отношению числа витков в них:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} = k, \qquad (155)$$

где w_1 и w_2 — соответственно число витков в первичной и во вторичной обмотках. Это отношение называется коэффициентом трансформации.

Если со вторичной обмотки получают напряжение, большее, чем подведено к первичной, то трансформатор называется повышающим. Если же вторичное напряжение меньше первичного, трансформатор называется понижающим. Один и тот же трансформатор можно использовать как понижающий и как повышающий.

Коэффициент трансформации указан в паспорте трансформатора как отношение высшего напряжения к низшему.

Мощности в первичной и во вторичной обмотках примерно равны между собой. Таким образом, для однофазного трансформатора

$$P = U_1 I_1 \approx U_2 I_2, \qquad (156)$$

где I_1 и I_2 — соответственно ток в первичной и во вторичной обмотках. Отсюда

$$k = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}, \qquad (157)$$

то есть токи в обмотках обратно пропорциональны напряжениям, а следовательно, и числам витков. Поэтому обмотку высшего напряжения всегда делают из провода меньшего сечения с бо́льшим числом витков, тогда как обмотку низшего напряжения изготавливают из проводов большего сечения, но с меньшим числом витков.

По числу фаз трансформаторы разделяются на однофазные и трехфазные, по числу обмоток — на двухобмоточные и трехобмоточные. По назначению трансформаторы бывают силовые, которые предназначены для передачи и распределения электрической энергии, и специальные, к которым относятся сварочные трансформаторы, измерительные (для расширения пределов измерения приборов в цепях переменного тока), печные (для электрических печей), испытательные (для различных электротехнических испытаний машин), инструментальные и т. д. К группе специальных трансформаторов может быть отнесен и автотрансформатор.

По способу охлаждения трансформаторы бывают с воздушным охлаждением (маломощные, до 10 *ква*),

с масляным, а также с масляным охлаждением и принудительным воздушным охлаждением масляного бака.

Сердечники и ярма трансформаторов набирают из отдельных листов специальной электротехнической стали, хорошо проводящей магнитные потоки. Листы стали изолируют друг от друга. Это уменьшает величину вихревых токов в сердечнике, снижает потери энергии в железе трансформатора на нагрев, а поэтому увеличивает коэффициент полезного действия трансформатора.

§ 2. Силовые трехфазные и однофазные трансформаторы

Для трансформирования трехфазного тока можно применять группу из трех однофазных трансформаторов, включаемых, как показано на рисунке 91, *а*, или один

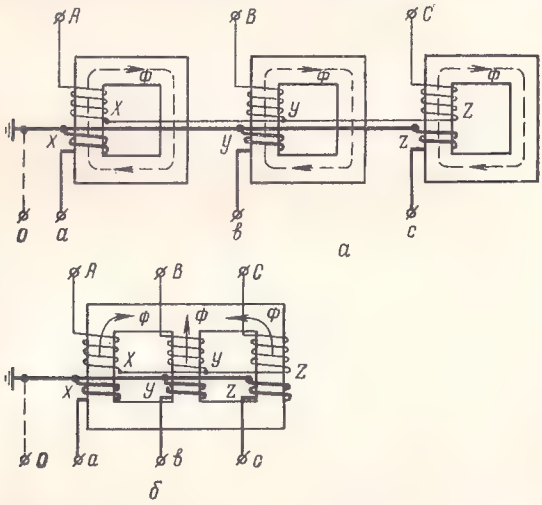


Рис. 91. Группа из трех однофазных трансформаторов (*а*) и эквивалентный им один трехфазный трансформатор (*б*):

A, *B*, *C* — выводы фаз высшего напряжения; *a*, *в*, *c* — выводы фаз низшего напряжения; *0* — нулевой вывод (нейтраль).

трехфазный трансформатор (рис. 91, *б*). Трехфазная группа однофазных трансформаторов имеет ряд существенных

недостатков: громоздкость, большой вес и высокую стоимость. Поэтому такой способ трансформации применяется только при очень больших мощностях (более 10 000 *ква*), при которых конструкция трехфазного трансформатора получается очень громоздкой.

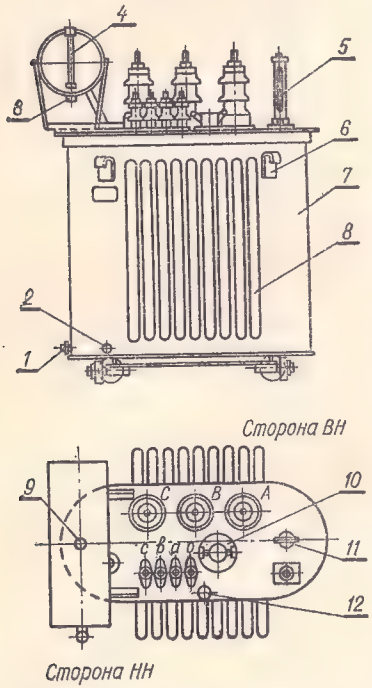


Рис. 92. Эскиз трехфазного силового трансформатора мощностью до 100 *ква*, 10/0,4 *кв*:

1— болт для заземления; *2*— пробка для спуска масла из бака; *3*— пробка для спуска масла из расширителя; *4* — указатель уровня масла; *5*— ртутный термометр; *6*— скобы для подъема трансформатора; *7*— бак; *8*— трубы для охлаждения масла; *9*— пробка для доливки масла; *10*— переключатель числа витков ВН; *11* — кольцо для подъема выемной части; *12* — пробка для взятия пробы масла.

Трехфазный трансформатор имеет сердечник, состоящий из трех вертикальных стержней, которые по концам замкнуты стальными ярмами. На каждом из сердечников помещают первичную и вторичную обмотки одной из трех фаз (рис. 92).

В таблице 12 приведены основные данные силовых трехфазных понижающих трансформаторов серии ТМ.

Трехфазные понижающие силовые трансформаторы серии ТСМ выпускают мощностью от 20 до 560 *ква*. От трансформаторов ТМ они отличаются тем, что в них использована холоднокатаная сталь (у ТМ — горячекатаная сталь). Трансформаторы ТСМ меньше по габариту, у них на 40% меньше вес масла, на 15—25% меньше потери короткого замыкания и холостого хода, на 1% меньше напряжение короткого замыкания, чем у трансформаторов ТМ.

У трансформатора ТСМА обмотки выполнены алюминиевым проводом.

Трансформаторы имеют широкую шкалу мощностей. Шкала напряжений у них несколько у́же. Трансформаторы

Таблица 12

Силовые трехфазные трансформаторы с масляным охлаждением

Тип	Номинальная мощность (*ква*)	Высшее напряжение (*кв*)	Низшее напряжение (*кв*)
ТМ-10/6	10	6	0,4 или 0,23
ТМ-20/6, ТМ-20/10	20	6 или 10	0,4 или 0,23
ТМ-50/6	50	6	0,4 или 0,23
ТМ-100/6, ТМ-100/10	100	6 или 10	0,4 или 0,23
ТМ-180/6, ТМ-180/10	180	6 или 10	0,4 или 0,23

одной и той же мощности, но на разные напряжения отличаются в основном числом витков в обмотках. При более высоком напряжении расходуется больше изоляции и увеличивается размер трансформатора. Железо и бак — одинаковые для всех напряжений при той же мощности и при том же максимальном высшем напряжении.

Однофазные силовые трансформаторы изготавливают типа ОМС-10/10 и ОМС-5/10, соответственно мощностью 10 и 5 *ква* с высшим напряжением 6 или 10 *кв*, а с низшим 2×220 *в*. Однофазные силовые трансформаторы типа ОМ имеют другие мощности: 4 и 10 *ква* при высшем напряжении 6 и 10 *кв*, 10 и 16 *ква* при высшем напряжении 20 *кв* и 16 и 25 *ква* при 35 *кв*. Низшее напряжение, передаваемое по трем проводам, во всех случаях составляет 2×220 *в*. Третий провод выводится от средней заземленной точки вторичной обмотки трансформатора; 440 *в* между концами обмотки используют для включения однофазных двигателей, а напряжения между концами и средней точкой вторичной обмотки — 220 *в* — для освещения и других целей.

Для питания контрольно-измерительной аппаратуры и ламп местного освещения выпускаются следующие трансформаторы, понижающие напряжение с 380—220 *в* (высшее) до 12—36 *в* (низшее): ТОСБ (однофазный, сухой, с сердечником броневого типа), ТС (трехфазный сухой). Цифры, стоящие после букв, означают мощность трансформатора в *ква* (0,25; 0,5; 1,5 *ква*). Однофазные трансформаторы типа ОС и ОСО (однофазный сухой осветительный) выпускаются мощностью 30—250 *ва*.

Для питания телевизоров и других радиоустройств, требующих постоянного напряжения, выпускаются трансформаторы-стабилизаторы типа ТСН-200 (200 *ва*). Они также называются феррорезонансными стабилизаторами напряжения.

§ 3. Номинальная мощность трансформатора

К основным параметрам трансформатора относятся: номинальная мощность, номинальные первичное и вторичное напряжения, коэффициент трансформации, напряжение короткого замыкания, потери холостого хода и потери короткого замыкания.

Номинальная мощность трансформатора определяется его тепловым режимом. Это та мощность, которую трансформатор может отдавать длительно при номинальных температурных условиях окружающей среды. Номинальные температурные условия определены ГОСТом: максимальное значение температуры окружающей среды составляет 35°, а среднегодовое 5°.

Тепловой режим трансформатора, соответствующий длительно развиваемой номинальной мощности, допускает превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха не более чем на 70°. При соблюдении теплового режима в рамках допустимого, а также соответствии окружающих условий номинальным температурным условиям, определенным ГОСТом, срок службы трансформатора составляет 20 лет.

Срок службы определяется степенью старения изоляции, то есть потерей эластичности и механической прочности ее вследствие нагрева. Состарившаяся изоляция при различных вибрациях обмоток из-за нарушения режима работы сети растрескивается и осыпается. При этом в обмотках трансформатора происходит короткое замыкание.

Нагрузочная способность трансформатора зависит от климатических условий. Если среднегодовая температура отличается от указанной ГОСТом температуры 5°, то номинальная мощность трансформатора может быть пересчитана по формуле

$$S_{н} = S_{н.\ пасп}\left(1+\frac{5-T}{100}\right)\ ква, \qquad (158)$$

где $S_н$ — мощность, пересчитанная на данный климатический район;

$S_{н.\ пасп}$ — номинальная мощность, указанная в паспорте *(ква)*;

T — среднегодовая температура окружающего воздуха в данном климатическом районе.

В аварийных случаях допускаются кратковременные перегрузки трансформаторов. Величина перегрузки и допустимое время действия данной перегрузки, независимо от температуры окружающего воздуха (но не выше+35°!), указаны в таблице 13.

Таблица 13

Допустимые перегрузки трансформаторов (кратковременные)

Величина перегрузки в % от номинальной мощности	Допустимая продолжительность	
	открытая установка трансформатора	закрытая установка трансформатора
30	2 *ч*	1 *ч*
60	45 *мин*	15 *мин*
75	20 *мин*	8 *мин*
100	10 *мин*	4 *мин*
200	1,5 *мин*	1 *мин*

Трансформатор можно перегружать, например, в часы максимума нагрузки за счет неполного заполнения суточного графика нагрузки. На каждые 10% снижения коэффициента заполнения графика против 100% допускается перегрузка на 3%. Это так называемое трехпроцентное правило. Полная допустимая перегрузка в процентах от номинальной мощности по этому правилу определяется так:

$$S_н = \frac{3\,(100 - k_{зап})}{10}\ \%, \qquad (159)$$

где $k_{зап}$ — коэффициент заполнения графика нагрузки в %, представляющий собой отношение площади суточного графика (в *квт·ч*) к произведению номинальной мощности трансформатора на 24 *ч*.

Трансформатор можно также перегружать в часы максимума в зимнее время на 1% от номинальной мощности на каждый процент недогрузки трансформатора в часы

максимума нагрузки летом, но не более чем на 15%. Это так называемое однопроцентное правило.

Можно суммировать все перегрузки, подсчитанные по трехпроцентному и однопроцентному правилам, но при этом суммарная перегрузка трансформатора не должна превышать 30% при открытой установке трансформатора и 20% при установке трансформатора в закрытом помещении.

§ 4. Номинальное первичное и вторичное напряжения

Номинальным первичным напряжением трансформатора называется такое напряжение, которое необходимо подвести к его первичной обмотке, чтобы на зажимах разомкнутой вторичной обмотки получить вторичное номинальное напряжение, указанное в паспорте трансформатора.

Номинальным вторичным напряжением называют напряжение, которое устанавливается на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора (к зажимам первичной обмотки подведено напряжение, а вторичная обмотка разомкнута) и при подведении к первичной обмотке номинального первичного напряжения.

Напряжение на вторичной обмотке при нагрузке изменяется, так как ток нагрузки создает падение напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях обмотки. Это изменение вторичного напряжения зависит не только от величины тока и сопротивлений обмотки, но и от коэффициента мощности нагрузки (рис. 93). Если трансформатор нагружен чисто активной мощностью (рис. 93,*а*), то напряжение по сравнению с другими вариантами меняется в меньших пределах. На векторной диаграмме $\dot{E}_2$ — э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора. Вектор вторичного напряжения будет равен геометрической разности:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 X_{тр} - \dot{I}_2 R_{тр},$$

где $\dot{I}_2$ — вектор тока во вторичной обмотке;
$X_{тр}$ и $R_{тр}$ — соответственно индуктивное и активное сопротивления вторичной обмотки трансформатора.

При индуктивной нагрузке и при той же самой величине тока напряжение снижается в большей степени (рис. 93,*б*). Это связано с тем, что вектор $\dot{I}_2 X_{тр}$, отстаю-

щий от тока на 90°, в этом случае более круто повернут навстречу вектору $\dot{E}_2$, чем в предыдущем. При емкостной нагрузке увеличение тока нагрузки вызывает повышение напряжения на обмотке трансформатора (рис. 93,*в*). В этом случае вектор $\dot{I}_2 X_{тр}$, по длине равный аналогичному вектору в первых двух случаях и также отстающий от тока на 90°, благодаря емкостному характеру этого тока оказывается повернутым вдоль вектора $\dot{E}_2$ и увеличивает длину $\dot{U}_2$ по сравнению с $\dot{E}_2$.

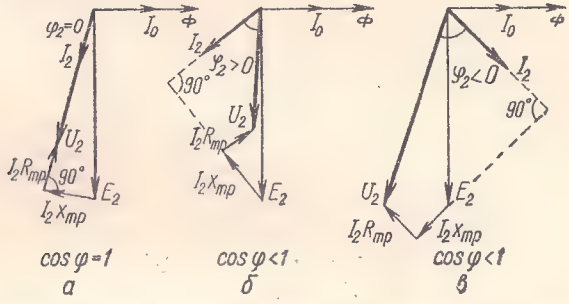


Рис. 93. Изменение вторичного напряжения трансформатора U_2 в зависимости от коэффициента мощности нагрузки (угла φ):

а — при активной нагрузке; *б* — при индуктивной нагрузке; *в* — при емкостной нагрузке; E_2 — э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора; I_2 — ток во вторичной обмотке (ток нагрузки); I_0 — намагничивающий ток трансформатора; $Ф$ — магнитный поток в сердечнике трансформатора; $R_{тр}$ и $X_{тр}$ — активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки.

В процессе эксплуатации необходимо регулировать величину напряжения на обмотке трансформатора. Это достигается изменением числа витков обмотки высокого напряжения. Меняя число витков этой обмотки, включенных в цепь высокого напряжения, можно менять коэффициент трансформации в пределах от ±5 до ±7,5% номинального значения.

Схема отводов от обмоток с простым переключением представлена на рисунке 94. В соответствии с этими отводами в паспорте указано минимальное высокое напряжение, номинальное и максимальное. Если, например, номинальное вторичное напряжение трансформатора равно 10 000 *в*, то напряжение максимальное $1{,}05U_н$=10 500 *в*, а напряжение минимальное 0,95 $U_н$=9500 *в*.

Для номинального напряжения 6000 *в* имеем соответственно 6300 и 5700 *в*. Число витков обмотки высшего напряжения изменяют переключателем, контакты которого находятся внутри трансформатора, а рукоятка выведена на его крышку.

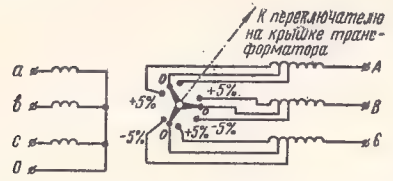


Рис. 94. Схема отводов от части витков для изменения коэффициента трансформации на ±5%.

Обычно для трансформаторов, которые устанавливаются вблизи понизительной подстанции 35/10 *кв* или повысительной 0,4/10 *кв*, коэффициент трансформации принимают равным $1{,}05\,k_н$, то есть ставят переключатель отводов в положение +5%. Если потребительская подстанция удалена от районной, в линии электропередачи возникает значительная потеря напряжения, поэтому переключатель ставят в положение — 5%. Трансформатор в средней точке линии электропередачи устанавливают на номинальный коэффициент трансформации (рис. 95).

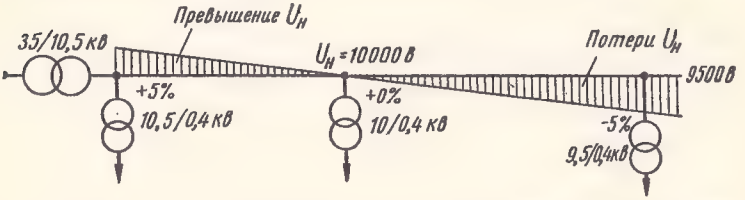


Рис. 95. Установка переключателя витков трансформатора в зависимости от удаления потребительской трансформаторной подстанции от питающей районной подстанции.

В настоящее время промышленность освоила выпуск силовых трансформаторов новой шкалы мощностей 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400 *ква* и т. д. Для регулирования напряжения новые трансформаторы снабжены устройствами ПРБ или РПН. ПРБ означает: переключение обмоток без возбуждения, то есть при выключенном трансформаторе. Отпайки от обмоток позволяют посредством их переключения менять напряжение в пределах от —5 до +5% через каждые 2,5%. РПН означает: регулирование напря-

жения под нагрузкой (автоматическое). Оно позволяет регулировать напряжение в пределах от—7,5 до+7,5% шестью ступенями, или через каждые 2,5%. Такими устройствами могут обеспечиваться трансформаторы от 63 *ква* и выше. Обозначение трансформатора с таким устройством — ТМН, ТСМАН.

Трехфазные трансформаторы ТМ и ТМН для трансформации энергии с 20 и 35 *кв* на 0,4 *кв* имеют мощности 100, 160, 250, 400 и 630 *ква*.

§ 5. Коэффициент трансформации и потери холостого хода. Напряжение короткого замыкания и потери короткого замыкания

Точная величина коэффициента трансформации представляет собой отношение э. д. с. обмотки высшего напряжения к э. д. с. обмотки низшего напряжения, независимо от того, какая из обмоток является первичной и ка-

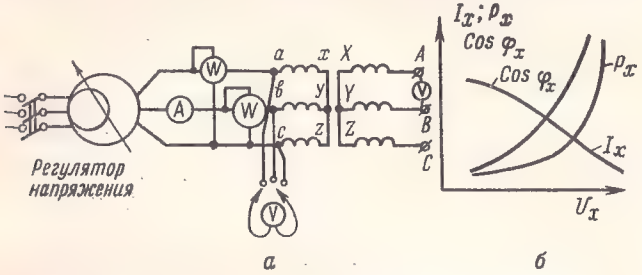


Рис. 96. Опыт холостого хода трансформатора:
а — схема опыта; *б* — характеристики холостого хода.

кая из них вторичная. Коэффициент трансформации можно определить опытным путем. Это бывает необходимо, если трансформатор не имеет таблички — паспорта.

Для этой цели проводят опыт холостого хода трансформатора. Обмотку низшего напряжения включают на устройство (потенциал-регулятор), позволяющее менять напряжение, подводимое к трансформатору (рис. 96,*а*).

Потенциал-регулятор позволяет изменять напряжение в широких пределах. Начальное напряжение потенциал-регулятора может быть равно нескольким десяткам вольт.

Для определения коэффициента трансформации к обмотке низшего напряжения достаточно подвести 0,1 $U_н$ для трансформаторов малой мощности и 0,3—0,5$U_н$ для трансформаторов большой мощности. Падение напряжения в первичной обмотке весьма мало. С достаточной точностью можно принять, что э. д. с. $E_1 = U_1$ и $E_2 = U_2$, так как ток во вторичной обмотке практически равен 0.

Из опыта холостого хода трансформатора определяют также зависимости тока холостого хода I_x, потребляемой мощности P_x и коэффициента мощности $\cos\varphi$ от величины подводимого напряжения U_1 при разомкнутой вторичной обмотке, то есть при $I_2 = 0$. Ток холостого хода силовых трансформаторов составляет от 10% (для маломощных трансформаторов) до 2% (для мощных трансформаторов) от номинального. При снятии характеристик холостого хода подводимое напряжение изменяют в пределах от 0,6 до 1,2$U_н$ таким образом, чтобы получить 6—7 показаний. На рисунке 96,*б* дан примерный вид характеристик холостого хода. Мощность холостого хода характеризует ту электрическую энергию, которая расходуется в трансформаторе, так как со вторичной обмотки энергию не потребляют. Энергия в трансформаторе расходуется на нагрев обмоток проходящим по ним током и на нагрев стали сердечника (вихревые токи и гистерезис). Потери на нагрев обмоток (потери в обмотках) при холостом ходе ничтожно малы. Практически можно считать, что все потери холостого хода сосредоточены в стали сердечника и идут на его нагрев.

Коэффициент мощности трансформатора определяют по формуле

$$\cos\varphi_x = \frac{P_x}{3U_{xф}I_x}, \qquad (160)$$

где P_x — полная мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе (сумма показаний двух ваттметров, приведенных на рисунке 96);

$U_{xф}$; I_x — средние значения фазных напряжения и тока.

Напряжение короткого замыкания $e_к$% равно такому напряжению, подведенному со стороны обмотки низшего напряжения, при котором в обмотке высшего напряжения, замкнутой накоротко, протекает номинальный ток.

Напряжение короткого замыкания $e_к$% указывается в паспорте трансформатора в процентах от номинального.

Это напряжение может быть определено из опыта короткого замыкания. Из этого опыта определяют также потери короткого замыкания (рис. 97). Так как в этом случае из-за малого напряжения, подведенного к обмотке низшего напряжения, магнитный поток в сердечнике весьма мал и сердечник не нагревается, то вся потребляемая трансформатором при опыте короткого замыкания мощность затрачивается на электрические потери в проводниках обмоток.

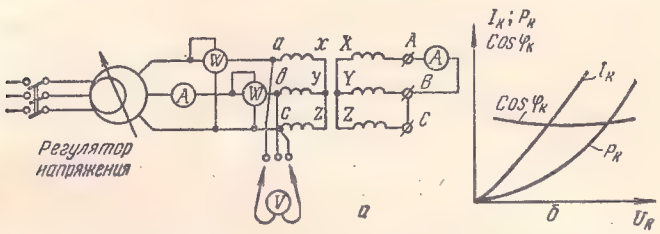


Рис. 97. Опыт короткого замыкания трансформатора:
а — схема опыта; *б* — характеристики короткого замыкания трансформатора.

Характеристики короткого замыкания представляют собой зависимости потребляемого тока, мощности и коэффициента мощности от подведенного напряжения при замкнутой вторичной обмотке. Величина подводимого напряжения находится в пределах 5—10% от номинального значения.

Значение $\cos\varphi$ определяется так:

$$\cos\varphi_к = \frac{P_к}{3U_{кф}I_к}. \qquad (161)$$

Сумма показаний ваттметров дает значение потерь в трансформаторе, которые вызывают нагрев обмоток. Мощность, показываемая ваттметрами:

$$P_к = P_{м1} + P_{м2} = 3I_1^2R_1 + 3I_2^2R_2, \qquad (162)$$

где R_1 и R_2 — сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Напряжение короткого замыкания, при котором во вторичной обмотке протекает ток, равный номинальному, выражается в процентах номинального:

$$e_к\,\% = \frac{U_{кф}}{U_{нф}}100. \qquad (163)$$

Напряжение короткого замыкания — важная характеристика трансформатора. По этой величине определяют возможность параллельной работы трансформаторов, по ней и ее составляющим определяют изменения вторичного напряжения трансформатора при изменении нагрузки. Используя эту величину, определяют токи короткого замыкания в условиях эксплуатации.

§ 6. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора определяют по следующей формуле:

$$\eta = \frac{k_з S_н \cos \varphi_2}{k_з P_н \cos \varphi_2 + P_х + k_з^2 P_{кн}}, \qquad (164)$$

где $k_з = \frac{I_2}{I_{2н}}$ — коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению действительной нагрузки к номинальной (отношению токов во вторичной обмотке);

$S_н$ — номинальная мощность трансформатора *(ква)*;

$P_х$ — потери в стали, равные мощности холостого хода трансформатора при номинальном напряжении. Потери в стали при номинальной нагрузке практически остаются равными той же величине, так как индукция в сердечнике изменяется незначительно;

$P_{кн}$ — потери короткого замыкания при номинальном токе и температуре обмоток 75°. Эти потери пропорциональны квадрату тока, а следовательно, и $k_з^2$.

Если проанализировать формулу (164), то окажется, что коэффициент полезного действия максимален, когда постоянные потери трансформатора равны переменным потерям. Но так как в практике трансформаторы не всегда загружены полностью, полагают при их расчете, что средняя их нагрузка равна 50—70% номинальной, и принимают отношение $P_х : P_{кн}$ равным 0,25—0,5. В этом случае коэффициент загрузки, при котором к. п. д. максимальный,

$$k_{з\,(\eta=макс)} = \sqrt{\frac{P_х}{P_{кн}}} = 0{,}5 \div 0{,}7. \qquad (165)$$

§ 7. Группа соединения обмоток трансформатора

В зависимости от способа соединения обмоток трансформаторы различают по группам и схемам соединений.

Группой соединения называется комбинация схем соединения обмоток высшего и низшего напряжения. Группа соединения показывает (по аналогии с взаимным расположением часовых стрелок — часовой и минутной) взаимное расположение векторов линейного низшего напряжения по отношению к векторам линейного высшего напряжения в каждой фазе. Вектор высшего напряжения принимают за минутную стрелку и устанавливают против цифры 12, а вектор низшего напряжения принимают за часовую стрелку.

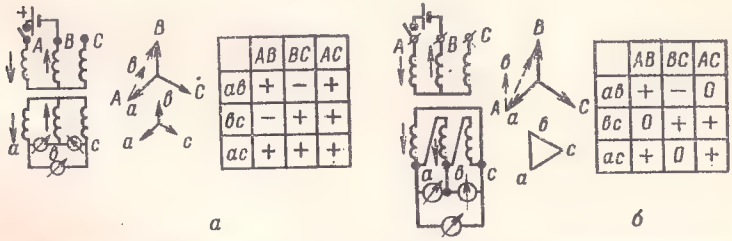
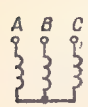
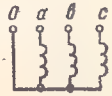
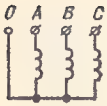
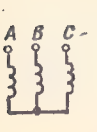
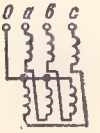
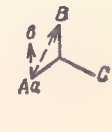
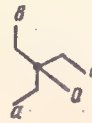


Рис. 98. Схемы и таблицы для проверки группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов:
а — для группы 12; *б* — для группы 11.

Из всех возможных способов соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов наибольшее распространение нашли схемы «звезда — звезда — нуль» (понизительные потребительские) и «звезда — нуль — треугольник» (повысительные). Это три первых случая в таблице 14.

Часто бывает необходимо определить группу соединения обмоток. Это делают разными способами. Наиболее простой из них — с применением источника постоянного тока на 2—4 *в*. Сначала источник постоянного тока подключают к зажимам *A* и *B* с соблюдением полярности, указанной на схеме (рис. 98). К зажимам обмотки низшего напряжения *ав*, *вс* и *ас* поочередно подключают гальванометр постоянного тока с нулевым отсчетом посредине шкалы и записывают знак отклонения прибора в момент

Схемы соединения обмоток трансформаторов

Схемы соединений		Диаграммы		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				Y/Y—12
				Y/Δ—11
				Y/Δ—11
				Y/Z_0—11

замыкания обмотки высшего напряжения на источник тока. Отклонение стрелки вправо отмечено знаком плюс, отклонение влево — знаком минус, отсутствие отклонения — нулем. Затем постоянный ток подводят к зажимам *BC* и *AC* и полностью заполняют табличку отклонений гальванометра. Каждой группе соединения обмоток соответствует своя таблица отклонений гальванометра, как показано на рисунке 98.

Один из существенных недостатков трехфазного потребительского трансформатора «звезда—звезда —нуль»— повышенный износ отдельных фаз при несимметричной нагрузке, в частности при преобладании бытовой и осветительной нагрузки. Поэтому признано целесообразным при несимметричной нагрузке применять трансформаторы «звезда — зигзаг — нуль» (нижняя схема в табл. 14). Обмотка каждой фазы низшего напряжения состоит из двух половин, расположенных на разных сердечниках. Поэтому при несимметричной нагрузке на фазы магнитный поток распределяется в магнитопроводе более равномерно, чем при схеме «звезда». Недостаток этих трансформаторов в том, что снижается мощность для тех же габаритов. Промышленность выпускает трансформаторы со схемой «звезда — зигзаг — нуль» мощностью 30, 55 и 90 *ква*. Эти трансформаторы соответственно имеют те же габариты, что и трансформаторы мощностью 40, 63 и 100 *ква* при схеме «звезда— звезда — нуль».

§ 8. Параллельная работа трансформаторов

При переменном графике нагрузки на подстанции может быть установлено два (реже — более двух) трансформатора, которые работают на общую сеть. При минимальной нагрузке работает один трансформатор, а при возрастании нагрузки в сеть включают и другой трансформатор.

Параллельная работа трансформаторов возможна, если соблюдены следующие требования: 1) номинальные первичные и вторичные напряжения равны; 2) трансформаторы имеют одинаковые группы соединения обмоток; 3) напряжения короткого замыкания трансформаторов равны; 4) отношение номинальной мощности наибольшего трансформатора к номинальной мощности наименьшего не более 3.

При несоблюдении первого и второго требований в цепи вторичных обмоток появляются большие уравнительные токи, которые вызывают ненужный нагрев и потери. При несоблюдении третьего и четвертого требований трансформаторы будут неравномерно нагружаться; следовательно, параллельная работа будет невозможной.

При установке трансформатора для параллельной работы с другим его фазируют, то есть определяют одноименные фазы на низшем напряжении, включив в сеть его

высоковольтную обмотку (рис. 99). Сначала попарно определяют концы обмоток низшего напряжения, между которыми нет разницы в напряжении. Затем измеряют напряжение между каждым из концов одной фазируемой стороны с двумя разноименными концами другой стороны (всего шесть измерений). Эти напряжения тоже должны быть одинаковыми. При напряжении вторичной стороны до 380 *в* для фазировки используют вольтметр или две последовательно соединенные лампы, рассчитанные на фазное напряжение. Для получения замкнутого электриче-

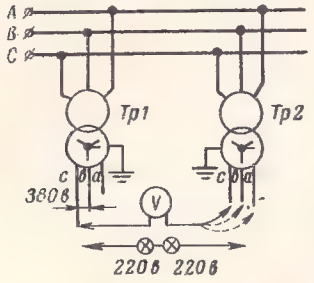


Рис. 99. Схема фазировки двух трансформаторов на напряжении до 380 *в*.

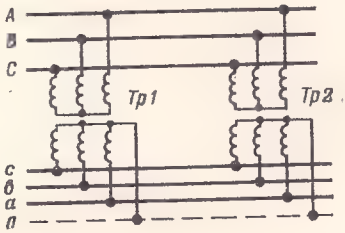


Рис. 100. Схема включения двух трехфазных трансформаторов на параллельную работу.

ского контура нулевые точки вторичных обмоток соединяют. У трансформаторов без заземленной нейтрали соединяют два одноименных зажима. Высоковольтные обмотки фазируют с использованием трансформаторов напряжения.

На рисунке 100 показана принципиальная схема включения трансформаторов на параллельную работу.

§ 9. Автотрансформаторы

Автотрансформатором называется трансформатор, в котором первичная и вторичная обмотки объединены в общую электрическую цепь, то есть однофазный автотрансформатор имеет одну обмотку, а трехфазный — три: на каждую фазу по одной. Совмещая первичную и вторичную обмотки, добиваются уменьшения веса и размеров автотрансформатора. На рисунке 101 приведены схемы однофазного *(а)* и трехфазного *(б)* автотрансформаторов. Такую схему

имеет, например, вольтодобавочный автотрансформатор ЛТМ (400 *ква*, 10 *кв* и 630 *ква*, 35 *кв*) с шестью ступенями переключения напряжения, причем каждая ступень изменяет напряжение на 2,5%. Если автотрансформатор по схеме *а* понижающий, то первичной обмоткой являются все витки, к которым подведено напряжение сети U_1. При этом каждый виток окажется под напряжением

$$u_в = \frac{U_1}{w_1}, \qquad (166)$$

где w_1 — число витков, включенных в сеть.

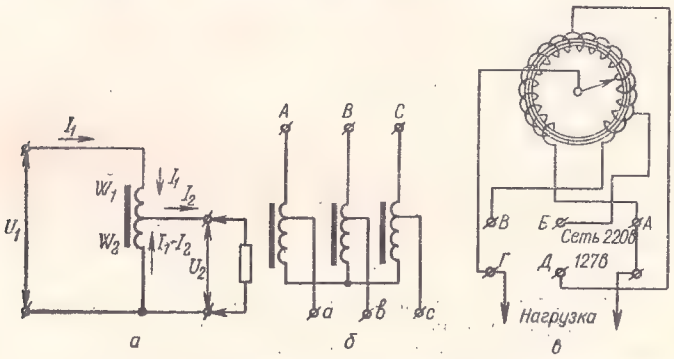


Рис 101. Схемы автотрансформаторов:
а — однофазного; *б* – трехфазного; *в* — лабораторного (ЛАТРа).

Вторичное напряжение U_2 пропорционально числу витков w_2, с которых снимается это напряжение,

$$U_2 = u_в w_2. \qquad (167)$$

Таким образом, при холостом ходе, когда потери напряжения на обмотках ничтожны, справедливо соотношение

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k, \qquad (168)$$

то есть автотрансформатор позволяет получить нужное напряжение, причем в автотрансформаторе оно получается как доля первичного сетевого напряжения.

В режиме нагрузки ток вторичной обмотки, по правилу Ленца, ослабляет своим магнитным потоком магнитный поток первичной обмотки. Поэтому ток I_2 направлен противоположно току I_1, и в общей части обмоток он равен разности токов I_1—I_2. Такое же противоположное направ-

ление имеют токи в обычном трансформаторе. Соотношение между токами, как отмечалось выше, равно

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{U_2}{U_1}=\frac{w_2}{w_1}=\frac{1}{k}. \qquad (169)$$

Поэтому общую часть обмотки автотрансформатора можно выполнять проводом меньшего сечения (когда коэффициент трансформации $k<2$).

Основное преимущество автотрансформаторов перед трансформаторами — меньший расход меди и стали. Уменьшаются также потери на нагрев железа и меди. Однако автотрансформаторы имеют и существенные недостатки. Изоляция их выполняется на наибольшее напряжение, так как обмотки соединены между собой, поэтому стоимость ее высокая. Условия безопасности усложняются, ибо если первичное напряжение высокое, то вторичные витки будут находиться под высоким потенциалом. Поэтому автотрансформаторы применяются, например, в тех случаях, когда необходимо преобразовать низкое напряжение в небольших пределах.

При высоких напряжениях автотрансформаторы выгоднее применять там, где требуется изменять напряжение в 1,5—2 раза, а при низких — не более чем в 3 раза. Лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) применяется в лабораторной практике для получения напряжения U_2 с плавной регулировкой от 0 до 250 *в* (рис. 101, *в*).

Трехфазные автотрансформаторы (рис. 101,*б*) используют также для пуска мощных двигателей переменного тока при пониженных токах. Для этой цели снижают напряжение автотрансформатором. Обмотки соединены в звезду. Сеть подключают к зажимам A, B, C, а двигатель в момент пуска — к зажимам a, $в$, c. После того как двигатель наберет обороты, его быстро переключают на сеть, а автотрансформатор отключают.

§ 10. Электросварочные трансформаторы. Электросварка

Электрическую сварку можно выполнять как на переменном, так и на постоянном токе. Сварка на постоянном токе бывает более высокого качества, так как дуга устойчивее. Электрическую дугу используют также для резки металлов; для этой цели применяют как угольные, так и металлические электроды.

Для дуговой сварки на переменном токе наиболее удобный и дешевый источник сварочного тока — специальный сварочный трансформатор. Самое широкое применение получили однопостовые сварочные трансформаторы для питания одной дуги. Сварочный ток регулируется дросселем *2* с раздвигающимся сердечником (рис. 102). Раздвигая сердечник, увеличивают или уменьшают воздушный промежуток в магнитопроводе, что приводит к изменению его самоиндукции, а следовательно, и сопротивления сварочной цепи. Так регулируют силу тока в соответствии с требованиями технологии сварки.

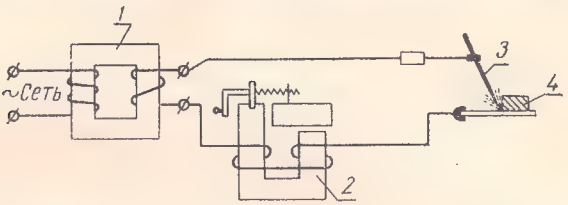


Рис. 102. Схема включения сварочного агрегата с трансформатором типа СТЭ:
1 — трансформатор 380—220/65 *в*; *2* — дроссель; *3* — электрод; *4* — свариваемые детали.

Первичная обмотка трансформатора *1* может быть рассчитана на включение в сеть переменного тока 220 или 380 *в*. Напряжение холостого хода на вторичной обмотке равно 65 *в*. Это напряжение считается относительно безопасным для человека и в то же время достаточным для возбуждения дуги. После возникновения дуги напряжение на вторичной обмотке снижается до 16—20 *в*. Благодаря наличию дросселя *2* ток короткого замыкания (если приваривают электрод *3* к свариваемой детали *4*) не превышает рабочий сварочный ток более чем на 40%.

Основные данные сварочных трансформаторов типа СТЭ и СТН следующие:

Марка трансформатора . .	СТЭ-24	СТЭ-34	СТН-500	СТН-700
Потребляемая мощность (*ква*)	24,6	33	32	43
Первичное напряжение (*в*)	220 или 380	220 или 380	220 или 380	220 или 380
Предел регулирования силы сварочного тока (*а*)	100—500	150—700	150—700	200—900
Номинальный к. п. д. (%)	82	86	85	85
Номинальный косинус *фи*	0,52	0,53	0,54	0,66

Трансформаторы типа СТН имеют однокорпусное исполнение с общей магнитной цепью трансформатора и регулятора-дросселя. Схема их включения представлена на рисунке 103. В этой установке по сравнению с СТЭ экономится сталь и уменьшается общий вес.

Изготавливаются также мощные сварочные трансформаторы ТСД-500 (42 *ква*), ТСД-1000 (76 *ква*), ТСД-2000 (172 *ква*). Они предназначены для автоматической сварки под флюсом. Воздушный промежуток в индукционном регуляторе регулируют дистанционно электродвигателем.

Сварочные трансформаторы типа СТЭ могут быть использованы для питания нескольких маломощных элект-

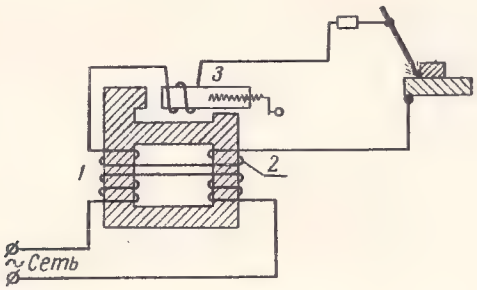


Рис. 103. Схема включения сварочного трансформатора СТН:

1 — первичная обмотка; *2* — вторичная обмотка; *3* — обмотка индукционного регулятора.

рических дуг (до 100 *а* каждая из 5 дуг). В этом случае каждый пост должен иметь свой дроссель. Трансформаторы типа СТН и ТСД для этой цели не могут быть использованы.

Технология дуговой сварки. Сущность сварки состоит в том, что металлический электрод под действием электрической дуги, возникающей между электродом и свариваемыми деталями, плавится и образует сварной шов. На металлический электрод наносят тонкий слой обмазки, которая при плавлении электродов образует газы, увеличивающие ионизацию дугового промежутка, что способствует поддержанию дуги. Поверх этого слоя наносят еще один слой обмазки, назначение которого — предотвратить окисление расплавленного металла. Этот

слой обмазки образует газы, которые вытесняют воздух из дугового промежутка.

Сварные соединения подразделяются на стыковые и угловые. Шов может быть односторонним или двухсторонним. Тонкие детали сваривают без снятия кромок, а при большой толщине свариваемых деталей кромки их срезают. При наварке валика шва электрод держат под углом 20—30° к вертикальной линии. Сварочный ток выбирают в зависимости от толщины электрода:

диаметр электрода (*мм*)	2	3	4	5	6
сварочный ток (*а*)	50—60	90—130	140—200	190—280	240—350

Скорость процесса сварки— 1,5—14 *м/ч*.

В ряде отраслей промышленности применяют контактную сварку: стыковую, точечную и шовную. При контактной стыковой сварке (рис. 104,*а*) концы свариваемой де-

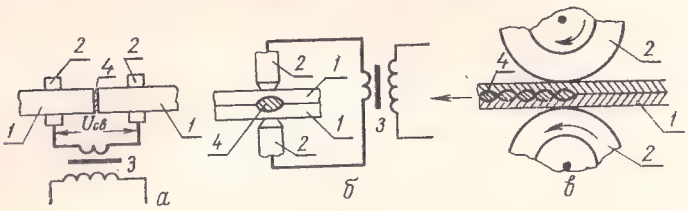


Рис. 104. Контактная сварка:
а — стыковая; *б* — точечная; *в* — шовная; *1* — свариваемые детали; *2* — контакты в сварочной цепи; *3* — сварочный трансформатор; *4* — место сварки.

тали *1* тщательно обрабатывают, зажимают в медных гильзах *2* и специальным механизмом плотно прижимают друг к другу. Затем включают сварочный трансформатор. Плотность тока колеблется при этом в пределах 10—100 *а/мм*^{2}; длительность нагрева равна 3—6 *сек*. Разогретый металл спрессовывают (осаживают). При этом торцы свариваются между собой, $U_{св} = 1{,}5 \div 3$ *в*.

При контактной точечной сварке (рис. 104,*б*) свариваемые листы *1* в точке сварки сжимают электродами *2*, к которым подводят напряжение от трансформатора *3*. Сварочный ток включают на такой промежуток времени, чтобы в месте сжатия листов образовалась капля расплавленного металла *4*, которая и создает точечную сварку.

При контактной шовной электросварке (рис. 104, *в*) свариваемые листы *1* сжимают вращающимися электродами *2*, к которым подводят напряжение от трансформатора. Процесс аналогичен предыдущему, но шов получается непрерывным, так как точки сварки перекрывают друг друга.

Глава X

Коллекторные электрические машины

§ 1. Устройство машины постоянного тока

Принцип действия простейшего генератора пульсирующего постоянного по направлению тока представлен на рисунке 105, *а*. Магнитное поле, образованное неподвижными полюсами *N* и *S*, пересекается проводом рамки, в котором и наводится э. д. с. Ее направление можно определить

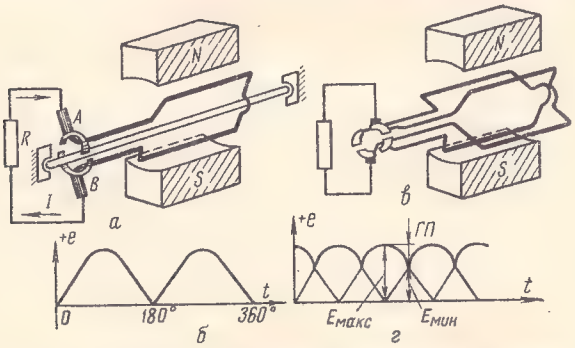


Рис. 105. Схема простейшего генератора с одной рамкой и двумя коллекторными пластинами (*а*), с двумя рамками и четырьмя коллекторными пластинами (*в*) и графики получаемой э. д. с. (*б* и *г*).

по правилу правой руки. Вместо колец, которые были у простейшего генератора переменного однофазного тока (рис. 40, гл. VI), здесь используется к о л л е к т о р. Он состоит из двух полуколец. Верхняя щетка *А* все время соединяется с той стороной витка, которая в данный момент находится под северным полюсом, а щетка *Б* — со стороной

над южным полюсом. Переключение щетки с одной коллекторной пластины на другую происходит в момент прохождения витков через нейтральную плоскость, расположенную горизонтально. Следовательно, напряжение на щетках хотя и изменяется по величине, остается постоянным по направлению.

Изменение во времени выпрямленной коллектором э. д. с. представлено на рисунке 105, *б*. Если ротор имеет две рамки, расположенные под углом 90° (рис. 105, *в*), а коллектор в этом случае состоит из четырех пластин, то характер изменения э. д. с. имеет такой вид, как на рисунке 105, *г*. Глубина пульсации э. д. с. (ГП) значительно уменьшилась. При шестнадцати коллекторных пластинах (8 рамок) глубина пульсации составляет лишь 0,97% среднего значения напряжения во внешней цепи, то есть практически во внешней цепи протекает постоянный ток. Коэффициент пульсации определяется так:

$$K_{\text{пульс}} = \frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{мин}}}{E_{\text{макс}}}.$$

Машины постоянного тока обратимы: если подвести напряжение к коллектору от внешнего источника тока, то рамка начнет вращаться. Направление вращения можно определить по правилу левой руки.

В небольших машинах постоянного тока мощностью в несколько ватт магнитное поле статора создается постоянными магнитами. В машинах мощностью от нескольких десятков ватт до сотен киловатт это магнитное поле создается электромагнитами. Весь статор в совокупности называется индуктором. Ротор называется якорем.

Кроме основных полюсов индуктора, на статоре устанавливают также добавочные полюса, назначение которых — уменьшить искрение щеток на коллекторе.

Сердечники полюсов статора-индуктора набирают из отдельных листов электротехнической стали. Их крепят болтами к станине статора, по которой замыкается магнитный поток полюсов. Так как магнитный поток в станине практически постоянный по величине, станину выполняют литой. Сердечник ротора-якоря набирают, как и сердечники полюсов, из отдельных листов электротехнической стали. Толщина стали 0,3—1 *мм*.

Коллектор выполняют из пластин твердотянутой меди, которые изолируют друг от друга миканитом. Щетки

выполняют из угля или графита с медным порошком. Их устанавливают в щеткодержателях, которые укрепляют на щеточных траверсах. Вал якоря опирается на подшипники в подшипниковых щитах, скрепленных со статором и удерживающих якорь между полюсами индуктора.

Промышленность выпускает машины постоянного тока главным образом для привода механизмов, требующих плавного регулирования скорости вращения в широких пределах, чего нельзя делать при помощи асинхронных двигателей. Наиболее распространены машины (генераторы и двигатели) типа ПН и МП. Взамен их в настоящее время выпускают машины типа П. Последние имеют шкалу мощностей от 0,13 до 200 *квт* со скоростью вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600 *об/мин* — для двигателей и шкалу мощностей от 0,5 до 1400 *квт* со скоростью вращения 2850, 1450, 1000, 300 *об/мин* — для генераторов. Напряжение электродвигателей 110, 220 *в* (по особому заказу — 440 *в*), напряжение генераторов 115, 230 *в* (460 *в*). Генераторы для зарядки аккумуляторов типа П (ПН) имеют мощности от 0,8 до 75 *квт* с регулированием напряжения от 110 до 160 *в* и от 220 до 320 *в*. Зарядные агрегаты типа АЗД имеют мощности от 4 до 12 *квт* и напряжения от 24 до 36 *в* и от 48 до 72 *в*.

Принцип электромагнитной индукции используется в магнитогидродинамических генераторах (МГД-генераторах), которым принадлежит большое будущее. Принцип действия МГД-генератора чрезвычайно прост: электродвижущая сила индуктируется в струе электропроводящего газа (плазме), пропускаемой в магнитном поле между полюсами мощного магнита. Электрический ток (постоянный) отводится от струи через проводящие пластины, касающиеся струи в местах наибольшего скопления противоположных по знаку зарядов. Таким образом, МГД-генератор аналогичен обычному генератору с той лишь разницей, что вращающаяся обмотка ротора заменена проводящим газом.

Ученые работают сейчас над высокотемпературными источниками тепла для получения плазмы и устройствами, способными удерживать плазму. Пока созданы экспериментальные генераторы довольно большой мощности, но способные работать в течение небольшого периода времени из-за утечки плазмы и износа пластин-электродов.

§ 2. Схемы включения и способы возбуждения генераторов постоянного тока

По способу возбуждения машины постоянного тока делят на машины с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

При независимом возбуждении (рис. 106, *а* и *б*) обмотка индуктора получает питание от постороннего источника тока — аккумулятора, выпрямителя, постороннего генератора постоянного тока. Ток возбуждения в таком случае не зависит от тока нагрузки и изменения напряжения на обмотке якоря. Напряжение U мало меняется при изменении тока нагрузки I.

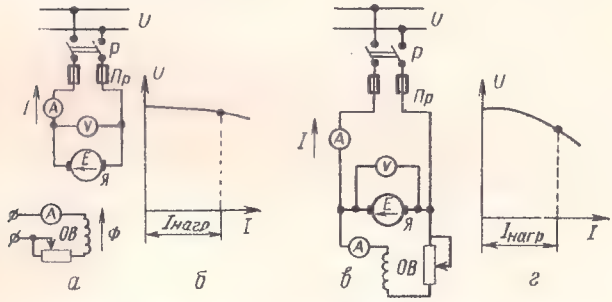


Рис. 106. Схемы включения генераторов с независимым возбуждением (*а*) и с самовозбуждением (*в*) и зависимости напряжения, индуктируемого генератором, от тока его нагрузки (*б* и *г*).

Генераторы с независимым возбуждением применяют в тех случаях, когда требуется постоянство напряжения, независимо от нагрузки, и плавное регулирование напряжения в широких пределах. Это осуществляется изменением тока возбуждения и числа оборотов.

Процесс самовозбуждения заключается в следующем (рис. 106, *в* и *г*). Магнитная система индуктора генератора сохраняет поток остаточного магнетизма, который не превышает 3% от полного потока. Под действием остаточного магнитного потока индуктора в обмотке якоря индуктируется небольшая э. д. с. Если обмотка возбуждения соединена так, что ток, протекающий под действием этой э. д. с., образует магнитное поле, совпадающее по направлению с остаточным, то э. д. с. в обмотке нарастает до тех пор, пока не достигнет номинальной для данного генера-

тора величины или пока падение напряжения в обмотке возбуждения не окажется равным э. д. с. машины. Изменяя сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения, регулируют напряжение генератора.

Обмотка возбуждения генератора с самовозбуждением может быть включена параллельно обмотке якоря, последовательно с обмоткой якоря и может быть разделена на две части, одна из которых включается параллельно, а другая — последовательно. В соответствии со способом включения обмотки возбуждения генераторы называются: с

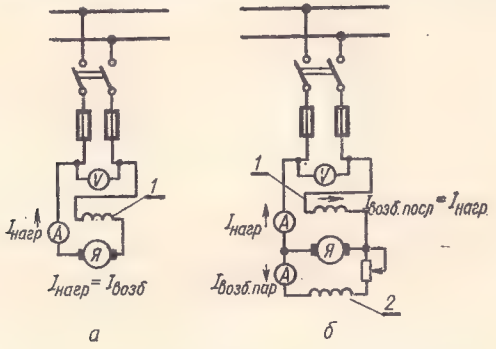


Рис. 107. Схемы генераторов с последовательным (*а*) и смешанным (*б*) возбуждением:
1 — последовательные обмотки возбуждения;
2—параллельная обмотка возбуждения.

параллельным возбуждением (шунтовые), с последовательным возбуждением (сериесные), со смешанным возбуждением (компаундные). На рисунке 107 представлены схемы генераторов с последовательным (*а*) и смешанным (*б*) возбуждением.

Наиболее широкое применение в практике получили генераторы с параллельным возбуждением. Генераторы с последовательным возбуждением не нашли применения, так как напряжение на их зажимах резко колеблется при изменении нагрузки, а при холостом ходе равно нулю. Генераторы со смешанным возбуждением применяются в установках с резким и частым колебанием нагрузки. Например, при резком увеличении нагрузки возрастает ток в последовательной обмотке, и ее поток усиливает общий поток возбуждения. Нагрузка преодолевается при незначительном колебании напряжения.

§ 3. Схемы включения двигателей постоянного тока

Как и генераторы, двигатели постоянного тока выполняют с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Вследствие обратимости машин постоянного тока генераторы могут работать в качестве двигателей, а двигатели — в качестве генераторов. Однако в конструкции двигателей имеются некоторые отличия от конструкций генераторов. Как указывалось выше, номинальное напряжение двигателей отличается от номинального напряжения генераторов. Имеются некоторые отличия в схемах включения.

Так, двигатели постоянного тока большой мощности включаются в сеть при помощи пусковых реостатов. Реостаты, представляющие собой дополнительное сопротивление в цепи обмоток двигателей, ограничивают пусковой ток, а также позволяют плавно, с постепенным увеличением оборотов, разогнать установку, состоящую обычно из рабочей машины и двигателя.

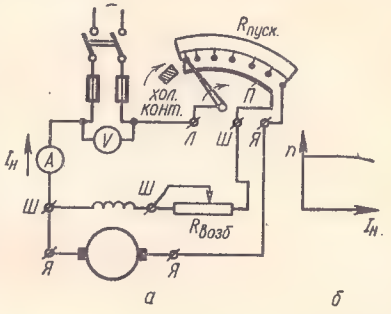


Рис. 108. Схема включения электродвигателя с параллельным возбуждением (*а*) и зависимость оборотов двигателя n от тока нагрузки $I_н$ (*б*).

Прямое, безреостатное, включение двигателей применяется лишь при незначительной мощности (до 1 *квт*). Концы обмоток двигателя постоянного тока выводят на его щиток. Их обозначения стандартные: *Я1*, *Я2* — соответственно начало и конец обмотки якоря; *Ш1* и *Ш2* — шунтовая (параллельная) обмотка возбуждения; *С1* и *С2* — сериесная (последовательная) обмотка возбуждения; *К* — компенсационная обмотка; *Д* — обмотка добавочных полюсов; *П* — пусковая; *У* — уравнительная и т. д. Схема включения двигателя с параллельным возбуждением представлена на рисунке 108, *а*. В пусковом реостате $R_{пуск}$ зажим *Л* соединяется с линией, зажимы *Я* и *Ш* соединяются с обмотками якоря и возбуждения (шунтовой). Пуско-

вой реостат имеет холостой контакт из изолирующего материала, на который устанавливают рукоятку пускового реостата при остановке двигателя или перед пуском. Чтобы цепь обмотки возбуждения при выключении двигателя оставалась замкнутой, в пусковом реостате есть пластина *П*, которая соединяет контакт *III* с первой ступенью пускового реостата. Если обмотка окажется разомкнутой, то при пуске в ней может возникнуть большая э. д. с., которая приведет к пробою изоляции или к поражению обслуживающего персонала. Большая э. д. с. самоиндукции может возникнуть также в момент размыкания этой обмотки, когда двигатель отключен от сети, но продолжает вращаться.

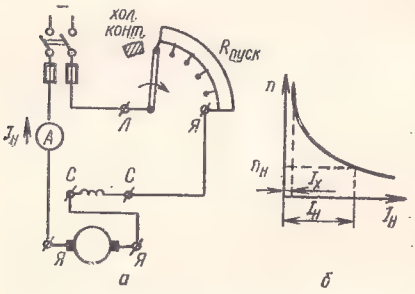


Рис. 109. Схема включения электродвигателя с последовательным возбуждением (*а*) и зависимость оборотов двигателя *n* от тока нагрузки $I_н$ (*б*).

При пуске включают рубильник, а затем, по мере разбега двигателя, ручку реостата постепенно перемещают вправо. Этим достигается плавность разбега, постоянство тока в сети (безреостатный пуск вызовет толчки большого тока в сети), постоянство вращающего момента на валу. При остановке двигателя ручку реостата устанавливают на холостой контакт и выключают рубильник.

Преимущества двигателя с параллельным возбуждением заключаются в том, что при изменении (увеличении) нагрузки скорость вращения меняется незначительно, двигатель обладает высокой перегрузочной способностью и широким пределом регулирования оборотов. Обороты регулируют изменением тока возбуждения (реостатом в цепи возбуждения), изменением напряжения на клеммах двигателя и изменением сопротивления пускового реостата. Первый способ применяют наиболее широко. Двигатели с параллельным возбуждением распространены в металлургической промышленности.

Схема включения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением представлена на рисунке 109, *а*.

На щитке двигателя зажимы обозначаются *СС* (сериесная — последовательная обмотка возбуждения) и *ЯЯ* (обмотка якоря). Обмотка возбуждения этого двигателя состоит из небольшого числа витков провода большого сечения, так как по ней проходит полный рабочий ток двигателя.

Двигатель с последовательным возбуждением при пуске в ход и при малых оборотах развивает большой вращающий момент. При нагрузках ниже 20—25% номинальной работа его практически недопустима из-за чрезмерного увеличения скорости вращения, которое опасно, так как возможно повреждение обмоток якоря под действием центробежных сил. Это резкое возрастание оборотов с уменьшением нагрузки (тока $I_н$) видно из графика (рис. 109, *б*). Работа на холостом ходу тем более недопустима. Этот двигатель широко применяется в транспортных и подъемных механизмах.

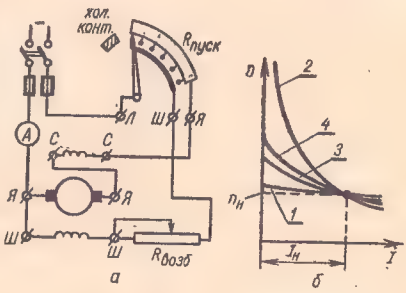


Рис. 110. Схема включения электродвигателя со смешанным возбуждением (*а*) и зависимость оборотов *n* от тока нагрузки *I* (*б*):

1 — характеристика двигателя с параллельным возбуждением; *2* — то же, с последовательным возбуждением; *3* и *4* — то же, со смешанным возбуждением с преобладанием параллельной (*3*) и последовательной (*4*) обмоток.

Схема включения двигателя со смешанным возбуждением представлена на рисунке 110, *а*. Этот двигатель занимает промежуточное положение между двигателями с параллельным и последовательным возбуждением. Применяется он в тех случаях, когда желательно иметь большую перегрузочную способность, как у двигателя с последовательным возбуждением, и в то же время избежать опасного свойства идти в разнос при малой нагрузке и при холостом ходе. Такие двигатели применяют в установках с резко изменяющейся и падающей до нуля нагрузкой (прессы, прокатные станы и т. д.).

§ 4. Автомобильные генераторы постоянного тока. Стартерный двигатель

На автомобилях, а также на самоходных комбайнах применяют генераторы постоянного тока мощностью 100—275 *вт* с номинальным напряжением 6 и 12 *в*. Генераторы приводятся в действие от двигателей внутреннего сгорания и предназначены для зарядки аккумуляторов и для освещения. На тракторах же, где электроэнергия в основном используется для освещения, применяют генераторы переменного тока с постоянными магнитами на роторе.

Генераторы постоянного тока для автомобилей и самоходных комбайнов выполняют с параллельным возбуждением. Один конец от обмотки якоря (одну из щеток) и один от обмотки возбуждения соединяют с корпусом (массой), два других конца выводят к зажимам *Я* и *Ш* на щитке генератора.

Во время работы машины обороты двигателя внутреннего сгорания колеблются в больших пределах. Соответственно в больших пределах меняются скорость вращения генератора и генерируемое напряжение. Использовать это напряжение непосредственно для потребителей тока на машине нельзя, так как лампочки, например, могут быстро перегорать от чрезмерного повышения напряжения и т. д.

Для поддержания напряжения генератора постоянным применяют вибрационные р е л е н а п р я ж е н и я (в и б р а ц и о н н ы й р е г у л я т о р) или используют регулирующую третью щетку. Рассмотрим каждый из способов регулирования напряжения.

Вибрационный регулятор напряжения изображен на рисунке 111, *а*. Принцип действия заключается в следующем.

Обмотка регулятора напряжения (*ОРН*) включена параллельно нагрузке. Сердечник *ОРН* намагничивается и стремится притянуть вибратор *2*. Однако пружина *П* отрегулирована так, что при номинальном напряжении вибратор не притягивается и его контакты $К_1$ и $К_2$ замкнуты. При увеличении скорости вращения двигателя и генератора увеличивается напряжение генератора, вибратор притягивается к сердечнику *ОРН*, контакты *К* размыкаются, и в цепь обмотки возбуждения *ОВ* включается дополнитель-

ное сопротивление $ДС_1$. Напряжение генератора снижается, вибратор под действием пружины отходит, контакты $К$ шунтируют дополнительное сопротивление $ДС_1$, напряжение генератора снова растет, и вибратор снова притягивается, снижается напряжение и т. д. Процесс размыкания и замыкания (вибрирования) контактов $К$ все время повторяется. При частоте колебаний вибратора 50 в секунду напряжение генератора практически остается постоянным. Для уменьшения искрения контактов $К$ включается искрогасительное сопротивление $ИС$.

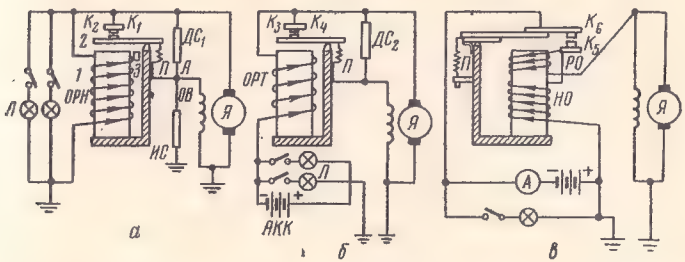


Рис. 111. Реле-регулятор напряжения и его составные части:

а — вибрационный регулятор напряжения; *б*— реле-ограничитель тока; *в* — реле обратного тока; *1* — сердечник ОРН (обмотки регулятора напряжения); *2* — вибратор; *3* — магнитный шунт; $К_1 \div К_6$ — контакты вибраторов; *П* — пружина; *ДС* — добавочное сопротивление; *ИС* — искрогасительное сопротивление; *ОВ* — обмотка возбуждения; *Я* — якорь генератора; *ОРТ* — обмотка регулятора тока; *НО* — параллельная намагничивающая обмотка; *РО* — последовательная размагничивающая обмотка.

Регулятор напряжения снабжен также магнитным шунтом *3*. Через него замыкается часть магнитного потока сердечника *1*. Шунт выполнен из сплава, магнитная проводимость которого меняется в зависимости от температуры. Чем ниже температура, тем выше магнитная проводимость. Таким образом, в зимнее время шунт замыкает бóльшую часть магнитного потока, чем летом. Следовательно, зимой необходимо большее напряжение на катушке *ОРН*, чтобы притянуть вибратор. Так автоматически достигается увеличение напряжения генератора, а следовательно, и величины зарядного тока в зимнее время.

В современных автомобилях регулятор напряжения используется совместно с реле-ограничителем тока и с реле обратного тока. Все три при-

бора монтируются на одной панели и составляют р е л е - р е г у л я т о р.

На рисунке 111, *б* представлена схема реле-ограничителя тока. Обмотка реле *ОРТ* включается последовательно в цепь зарядного тока. Катушка имеет небольшое число витков большого сечения, так как по ней проходит весь ток нагрузки. При увеличении зарядного тока выше определенного предела катушка притягивает к себе вибратор (контакты $К_3$ и $К_4$ размыкаются) и в цепь обмотки возбуждения генератора включается дополнительное сопротивление $ДС_2$. Возбуждение уменьшается, напряжение генератора снижается. В остальном работа реле-ограничителя тока происходит подобно регулятору напряжения.

Р е л е о б р а т н о г о т о к а представлено на рисунке 111, *в*. Его назначение состоит в том, чтобы при понижении напряжения генератора ниже, чем напряжение аккумулятора, последний не разряжался на генератор. Реле пропускает ток только в одном направлении: от генератора к аккумулятору. При обратном токе оно размыкает цепь между аккумулятором и генератором. Реле имеет две обмотки: параллельную — намагничивающую (*НО*) и последовательную — размагничивающую (*РО*). Последовательная обмотка, имеющая небольшое число витков из толстого провода, включена последовательно в цепи якоря. Она включена таким образом, что при направлении тока от генератора к аккумулятору ее магнитное поле совпадает по направлению с полем обмотки *НО*. Если же напряжение генератора упало (снизилась скорость) ниже величины напряжения аккумулятора, то ток изменит направление и поток последовательной катушки ослабит поток параллельной катушки, контакты $К_5$ и $К_6$ разомкнутся. Следующее замыкание этих контактов произойдет тогда, когда напряжение генератора станет несколько больше, чем э. д. с. аккумулятора.

Наибольшее распространение получил реле-регулятор типа РР-12.

Регулирование напряжения третьей щеткой. В отличие от рассмотренных выше генераторов с параллельным возбуждением в этом генераторе обмотка возбуждения включена между одной из двух главных щеток и третьей щеткой. Ее использование для регулирования напряжения основано на явлении реакции якоря. Это явление заключается в следующем (рис. 112). При работе генератора под нагруз-

кой в обмотке якоря протекает ток, который образует магнитное поле якоря. Поле якоря воздействует на основное поле индуктора, ослабляет и искажает его. Магнитные силовые линии результирующего поля смещаются при этом в сторону вращения якоря (рис. 112, *в*). Чем больше напряжение на зажимах генератора, тем больше ток в цепи якоря, тем больше искажается и ослабляется общее поле. Третья щетка *1* (рис. 113) установлена на коллекторе таким образом, что магнитное поле, индуктирующее э. д. с. между третьей и основной щетками, на которые включена обмотка возбуждения, уменьшается при увеличении скорости вращения генератора. С умень-

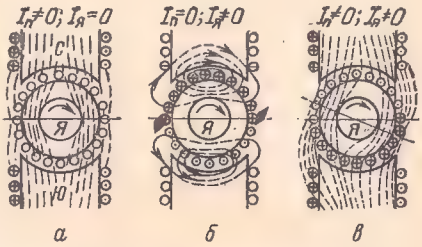


Рис. 112. Поле индуктора при $I_я = 0$ (*а*), поле якоря при $I_п = 0$ (*б*) и результатирующее поле с учетом реакции якоря (*в*).

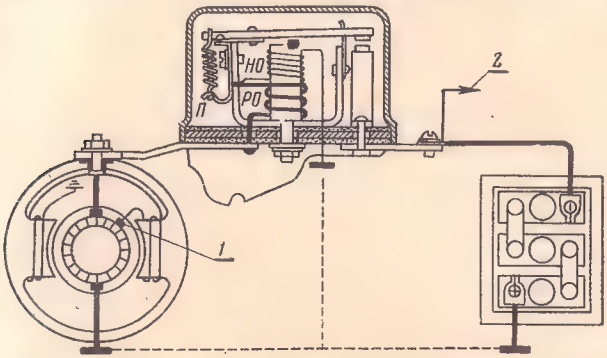


Рис. 113. Регулирование напряжения третьей щеткой и одним реле обратного тока:

1 — третья щетка; *2* — к системе зажигания; *НО* и *РО* — намагничивающая параллельная и размагничивающая последовательная обмотки; *П* — пружина.

шением оборотов это магнитное поле увеличивается. Таким образом, напряжение на зажимах генератора остается примерно постоянным по величине.

При необходимости увеличить величину зарядного тока (в зимних условиях и т. п.) третью щетку следует сдвинуть в направлении вращения якоря, и наоборот.

Недостатки генератора с третьей щеткой по сравнению с генераторами с реле-регуляторами следующие: 1) не обеспечивается автоматическая регулировка зарядного тока, так как в ночное время, когда включено освещение, зарядный ток снижается; 2) генератор не может быть использован без аккумуляторной батареи; 3) при изменении числа оборотов ток во внешней цепи изменяется. В настоящее время эти генераторы заменяют на генераторы двухщеточные с реле-регулятором.

Стартерный двигатель, применяемый на автомобилях для проворачивания коленчатого вала двигателя во время пуска,— это двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, питаемый от аккумуляторной батареи. В цепи обмоток якоря и индуктора стартера протекают очень большие токи: порядка 300—400 *а*. Поэтому эти обмотки выполняются медными шинами большого сечения с небольшим числом витков, причем у индуктора они изолированы, а у якоря — голые. Коллектор более массивен, чем у генератора. Обмотки *3* индуктора одним концом подключены к минусовым щеткам (см. рис. 114), а другие их концы соединены в общую точку и подведены к стартерной кнопке *2*. Две плюсовые щетки замкнуты на массу *4*. Плюс аккумуляторной батареи также соединен с массой. При нажатии на кнопку *2* стартерного пуска ток проходит по следующему пути: плюс аккумулятора — масса — плюсовые щетки коллектора — обмотка якоря — минусовые щетки коллектора — обмотка полюсов индуктора *3* — минус аккумулятора.

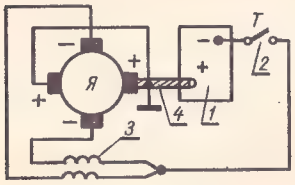


Рис. 114. Схема включения стартерного электродвигателя:

1 — аккумуляторная батарея; *2* — стартерная кнопка; *3* — обмотки возбуждения; *4* — масса (корпус двигателя).

Во избежание порчи аккумулятора из-за больших токов разряда включать стартерный двигатель можно на очень короткий срок — до 8 *сек*.

§ 5. Коллекторные машины переменного тока

Коллекторные двигатели переменного тока небольшой мощности применяют для привода бытовых пылесосов, полотерных и швейных машин, вентиляторов, мясорубок и др. По своему устройству эти двигатели аналогичны двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением и могут работать от сети переменного и постоянного токов. Часто эти двигатели выполняют универсальными, рассчитанными для работы и на переменном и на постоянном токе. Для этой цели у двигателей мощностью более 60—80 *вт* от обмотки возбуждения делают дополнительный вывод. При включении в сеть переменного тока обмотка возбуждения имеет меньшее число витков, а при постоянном токе включается вся обмотка возбуждения.

Поскольку в машинах переменного тока возникает переменный магнитный поток, статор собирают из тонких листов электротехнической стали, в то время как ярмо статора машин постоянного тока выполняют из литой или прокатанной стали.

Коллекторные двигатели развивают высокий пусковой и вращающий моменты, имеют высокие обороты — 20 и более тыс. в минуту, следовательно, ограниченные размеры и вес. Недостатки коллекторных машин переменного тока, ограничивающие их распространение: сложность изготовления, относительно высокая стоимость, необходимость тщательного ухода за коллектором и щетками, меньшая надежность в работе, чем асинхронных электродвигателей.

Чтобы изменить направление вращения коллекторного двигателя, нужно поменять местами концы обмотки возбуждения.

Коллекторные однофазные и трехфазные двигатели большой мощности (до 100—200 *квт*) имеют специальное назначение и распространены мало.

§ 6. Основные правила ухода за коллекторными машинами и их эксплуатации

Перед пуском машины следует проверить: нет ли на машине и внутри нее посторонних предметов, правильно ли собраны схемы включения машины и пусковой аппаратуры, исправность механической передачи, состояние коллектора и контактов, выполнено ли заземление, есть ли соответст-

вующие предохранители, надежность крепления машины к фундаменту и к салазкам, наличие смазки, исправность щеточного аппарата, плотность прилегания щеток. Следует также провернуть ротор машины от руки.

При работе машины необходимо следить за ее нагревом. Перегрев чаще всего является следствием перегрузки машины. Он опасен для изоляции обмоток и может вывести машину из строя.

Уход за обмоткой заключается в контроле за состоянием ее изоляции, удалении с нее пыли и грязи (слегка промасленной тряпкой). Необходимо следить за состоянием вентиляции машины, очищать от пыли и грязи вентиляционные каналы, периодически измерять сопротивление изоляции между обмотками и корпусом машины, коллектором и корпусом, между параллельной и последовательной обмотками и т. д. Величина его должна быть не менее 1000 *ом* на 1 *в*.

Уход за коллектором включает чистку, шлифовку и обточку. Чистить коллектор следует сухой тряпкой или неволокнистой ветошью один раз в смену после остановки машины. При появлении на пластинах коллектора царапин или шероховатостей его шлифуют. Для этого щетки снимают и при пониженной скорости вращения от постороннего двигателя прижимают к коллектору стеклянную бумагу с помощью деревянной колодки. Если коллектор потерял строго цилиндрическую форму и бьет при работе, а также если на нем есть глубокие царапины или выгорания, его обтачивают на токарном станке. Медь коллектора изнашивается быстрее миканитовых прокладок между пластинами. Поэтому последние вырезают специальной пилкой (продольными движениями вдоль пластин коллектора) на глубину 0,5—1 *мм*. Эта операция называется п р о д о р а ж и в а н и е м. После продораживания коллектор шлифуют, а острые края пластин перед шлифовкой срезают шабером.

Щетки должны быть правильно выбраны, правильно установлены, плотно прижаты. Их необходимо своевременно заменять. Новые щетки следует пришлифовывать к коллектору. Это делается при помощи наждачной бумаги, которую прокладывают между коллектором и щетками рабочей поверхностью к щеткам. При неподвижном якоре наждачную бумагу протягивают по направлению вращения якоря до тех пор, пока щетка не примет форму коллек-

тора. После этого щетку таким же образом обрабатывают мелкой стеклянной бумагой, пока ее рабочая поверхность не станет зеркальной. Сильно загрязненные щетки протирают чистой тряпкой, смоченной в бензине или содовом растворе.

Подшипники нужно содержать в чистоте и защищать от попадания пыли и грязи. В подшипники скольжения необходимо доливать масло (веретенное «З», машинное «Л», машинное «С») не реже одного раза в 10 дней. При нормальной работе машины масло заменяют полностью через 2—3 месяца, а в пыльном помещении это делают чаще. Температура подшипников скольжения не должна превышать 80°, а качения — 95°.

В подшипниках качения смену смазки с предварительной промывкой их в керосине делают один-два раза в год. Пополняют смазку не реже одного раза в 3 месяца.

Необходимо следить за правильным натяжением ремня и чистотой шкивов и ремня.

Глава XI

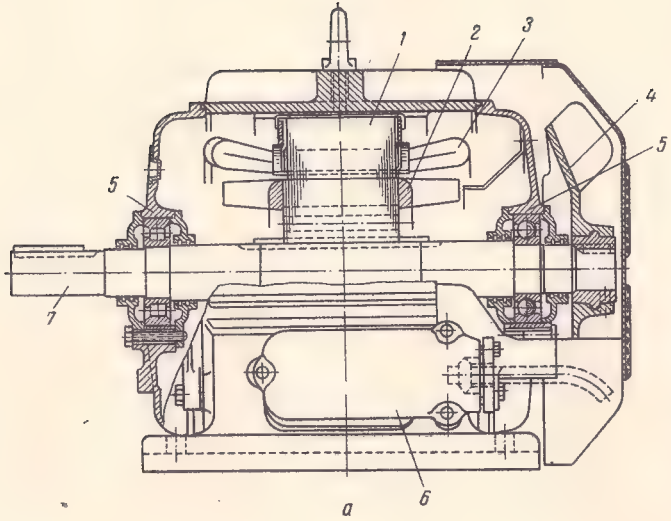
Асинхронные машины

§ 1. Устройство асинхронного двигателя

Асинхронной машиной переменного тока называется такая машина, в которой магнитное поле вращается со строго постоянными (синхронными) оборотами, определяемыми частотой сети и числом полюсов на фазу, но число оборотов ротора которой изменяется в зависимости от нагрузки.

Асинхронные машины используют в качестве электрических двигателей и генераторов. К асинхронным машинам могут быть отнесены преобразователи частоты с использованием асинхронных двигателей и др.

Асинхронные электродвигатели, которые были изобретены русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским, по своему распространению занимают первое место и составляют более 95% всех типов электродвигателей, применяемых в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства.



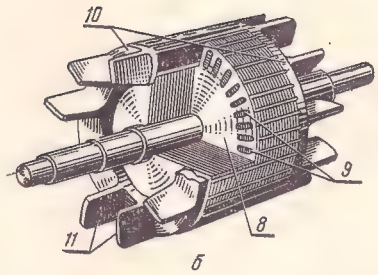


Рис. 115. Электродвигатель типа АО:

а — разрез электродвигателя; *б* — устройство короткозамкнутого ротора; *1* — статор; *2* — короткозамкнутый ротор; *3* — обмотка статора; *4* — крыльчатка охлаждения; *5* — подшипниковые щиты; *6* — место выводов от статорной обмотки; *7* — место посадки шкива на вал двигателя; *8* — сердечник ротора; *9* — стержни обмотки ротора (алюминий); *10* — кольца, замыкающие стержни; *11* — лопатки охлаждения.

Асинхронный короткозамкнутый электродвигатель (рис. 115) состоит из с т а т о р а *1* — неподвижного кольцевого сердечника, набранного из листов электротехнической стали, в пазах которого уложена статорная обмотка *3*; ротора *2*, вращающегося в подшипниках, укрепленных в двух щитах *5* двигателя. Сердечник ротора (рис. 115, *б*) также набран из отдельных листов электротехнической стали. В пазах укладывается стержневая обмотка *9* ротора, накоротко замкнутая кольцами *10* по концам.

Т р е х ф а з н а я статорная обмотка включается в трехфазную сеть. В обмотке возникает вращающееся магнитное поле, так как максимумы напряжения синусоидальной формы, подведенные к трем обмоткам статора, сдвинуты относительно друг друга по времени.

Магнитные силовые линии вращающегося поля статора пересекают стержни обмотки ротора и наводят в них электродвижущую силу. Под действием этой наведенной э. д. с. в замкнутых накоротко по концам стержнях ротора протекает ток. Вокруг стержней возникают магнитные потоки, создающие общее магнитное поле ротора, которое, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создает усилие, заставляющее вращаться ротор в направлении вращения магнитного поля статора.

Чем быстрее вращается ротор, тем меньше индуктируемые в его обмотке токи, меньше сила взаимодействия между магнитными полями ротора и статора. Поэтому с увеличением нагрузки ротор должен снизить обороты, чтобы возросли индуктируемые в нем токи и возрос вращающий момент.

§ 2. Технический паспорт электродвигателя. Типы двигателей

К каждому электрическому двигателю прилагается паспорт, в котором указаны сведения, необходимые для правильной его эксплуатации. Паспорт в виде металлического щитка укрепляется на корпусе двигателя. В паспорте трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя указано следующее (рис. 116): 1) тип электродвигателя; 2) заводской номер; 3) номинальное напряжение питающей сети; 4) номинальный ток, потребляемый двигателем из сети; 5) номинальная мощность электродвигателя; 6) скорость вращения ротора при номинальной нагрузке;

7) коэффициент мощности при номинальной нагрузке; 8) коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке; 9) частота переменного тока; 10) год выпуска; 11) вес; 12) ГОСТ, в соответствии с которым выполнен двигатель. Для двигателей с фазным ротором указывают также напряжение в обмотке ротора и величину тока в ней при номинальной нагрузке.

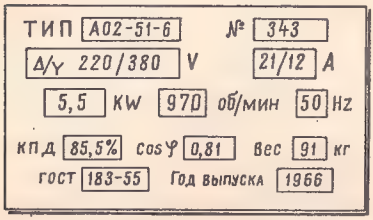


Рис. 116. Технический паспорт асинхронного короткозамкнутого электродвигателя.

Остановимся подробно на основных сведениях технического паспорта и расшифруем их.

В марке двигателя (например, АЛ2-32-4 или АО2-42-6) буквенные символы означают его исполнение. Двигатели единой серии имеют следующие символические обозначения: *А* — корпус чугунный, исполнение защищенное; *АЛ* — корпус алюминиевый, исполнение защищенное; *АО* — корпус чугунный, закрытого исполнения, охлаждение — обдуванием корпуса снаружи; *АОЛ* — корпус алюминиевый, закрытого исполнения, обдуваемый (охлаждение — обдуванием корпуса снаружи).

Новая серия электродвигателей А2 и АО2 разработана взамен серии А и АО. Преимущества новой серии: 1) твердая шкала мощностей с числом ступеней 18 вместо 14 у серии А; 2) повышенные к. п. д. и коэффициент мощности; 3) меньший вес на единицу мощности; 4) меньшие габаритные размеры; 5) соответствие установочных размеров международным требованиям; 6) большая эксплуатационная надежность в связи с использованием высокопрочных изоляционных материалов и лаков, а также в связи с тем, что двигатели с 1-го по 5-й габарит будут выпускаться только в закрытом исполнении; 7) меньшая скорость нарастания температуры обмоток статора при пуске; 8) большие эксплуатационные удобства. Двигатели закрытого исполнения АО2 выпускают с 1-го по 9-й габарит, а двигатели защищенного исполнения — с 6-го по 9-й.

Двигатели 1-го, 2-го и 3-го габаритов изготавливают как в чугунном корпусе (А2 и АО2), так и в алюминиевом (АОЛ2, АЛ2).

Указанные типы двигателей предназначают для общего применения. Но выпускают также и следующие модификации: а) с повышенным пусковым моментом (АОП); б) с повышенным скольжением (АОС); в) многоскоростные двигатели; г) для текстильной промышленности (АОТ); д) с алюминиевыми обмотками (в конце обозначения типа указывается буква А, например АО2-42-4А); е) с фазным ротором (АОК).

Выпускают также специализированные двигатели. Двигатели тропического исполнения в конце обозначения имеют букву Т, двигатели химостойкие — букву Х (АО2-72-4Х), влаго- и морозостойкие — буквы ВМС, малошумные — букву Ш. Выпускают также однофазные двигатели этой серии. Встраиваемые двигатели имеют обозначение АОПВ.

Двигатели рассчитывают для работы в окружающей температуре до 40°, а тропического исполнения — до 45°.

Электродвигатели общего применения изготавливают на номинальные напряжения 220/380 *в* и 380 *в* (для возможности пуска с переключением со звезды на треугольник).

Число после первого тире обозначает типоразмер: первая цифра — порядковый номер наружного диаметра сердечника статора (габарит), а вторая — номер длины электродвигателя. После второго тире указано число полюсов на фазу. В зависимости от числа полюсов находится число оборотов магнитного поля. Предположим, каждая фаза имеет два полюса (то есть одну пару полюсов). В упрощенном представлении это означает, что обмотка каждой фазы выполнена в виде одной катушки. В этом случае (рис. 117, *а*) в течение одного периода максимум магнитного поля, перемещаясь от фазы к фазе, сделает один полный оборот. В момент времени *1* в обмотке *I*, включенной в фазу *A*, будет максимум магнитного поля, образованный положительным максимумом тока в этой фазе. В момент *2* положительный максимум тока будет в фазе *B* и, таким образом, максимум магнитного поля будет в обмотке *II*. И, наконец, в момент времени *3* обмотка *III*, включенная в фазу *C*, будет иметь свой максимум. Затем этот положительный максимум переместится вновь в обмотку *I*. Таким образом, за один период колебания тока, то есть за $^1/_{50}$ *сек*, магнитное поле сделает 1 оборот, за 1 *сек* — 50 оборотов, за одну минуту $50 \times 60 = 3000$ *об/мин*.

Рассмотрим теперь электродвигатель с четырьмя полюсами на фазу, то есть с двумя парами полюсов. В этом

случае каждая фазная обмотка как бы состоит из двух катушек (рис. 117, *б*). В момент времени *1* максимум магнитного поля будет в одной (*I*) и второй (*I'*) катушках обмотки, включенной в фазу *A*. Соответственно в моменты времени *2* и *3* максимум переместится в обмотки *II* и *III*, а в момент времени *4* он снова будет в обмотке *I*. Таким образом, за один период тока в сети максимум магнитного поля

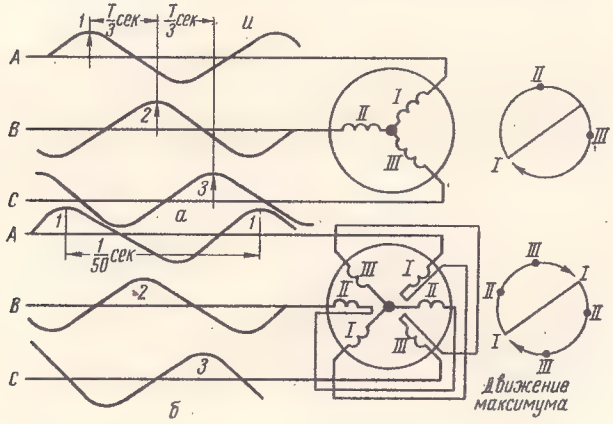


Рис. 117. Зависимость числа оборотов магнитного поля от числа пар полюсов на фазу:

а — обмотка каждой фазы имеет одну пару полюсов; *б* — обмотка каждой фазы имеет две пары полюсов; *A*, *B*, *C* — фазы сети; *I*, *II*, *III* — фазные обмотки электродвигателя; *T*—период колебания, равный $^1/_{50}$ *сек*.

переместится всего лишь на пол-оборота, за 1 *сек* он сделает 25 оборотов и за 1 *мин* $25 \times 60 = 1500$ оборотов.

Если двигатель выполнен с числом полюсов на фазу 6, 8 или 10, то соответственно скорость вращения магнитного поля составит 1000, 750 или 600 *об/мин*. Скорость вращения магнитного поля может быть подсчитана по приведенной ранее формуле

$$n_{\text{м. п}} = \frac{60f}{p} = \frac{3000}{p} \text{ об/мин},$$

где f — частота ($f=50$ *пер/сек*);
p — число пар полюсов на фазу (число же полюсов равно $2p$).

§ 3. Напряжение сети и схемы соединений обмоток. Определение согласованных выводов (начал и концов) фаз статорной обмотки

Если в паспорте электродвигателя указано, например, 220/380 *в*, это означает, что электродвигатель может быть включен как в сеть 220 *в* (схема соединения обмоток — треугольник), так и в сеть 380 *в* (схема соединения обмоток — звезда).

Статорные обмотки асинхронного электродвигателя имеют шесть концов. По ГОСТу они имеют следующие обозначения:

	I фаза	II фаза	III фаза
Начала	C_1	C_2	C_3
Концы	C_4	C_5	C_6

Если в сети напряжение равно 380 *в*, то обмотки статора должны быть соединены по схеме звезда (Y). В общую точку при этом (рис. 118, *а*) собраны или все начала (C_1,

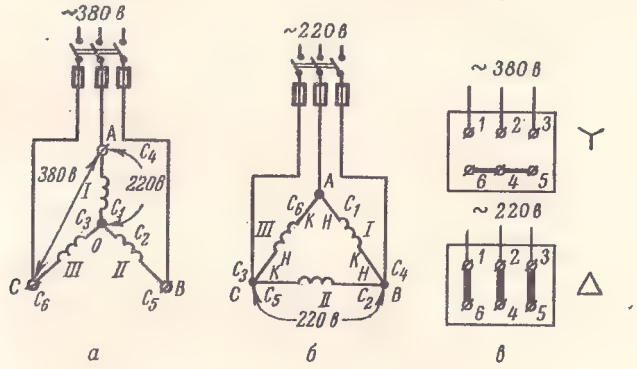


Рис. 118. Схема включения обмоток двигателя:
а — в звезду; *б* — в треугольник; *в* — исполнение схем «звезда» и «треугольник» на доске зажимов.

C_2, C_3), или все концы (C_4, C_5, C_6). Напряжение 380 *в* приложено между концами обмоток AB, BC, CA. На каждой же фазе, то есть между точками O и A, O и B, O и C, напряжение будет в $\sqrt{3}$ раз меньше: $380/\sqrt{3}=220$ *в*.

Если в сети напряжение 220 *в*, то обмотки статора должны быть соединены по схеме треугольник (△). В точках

A, *B* и *C* соединяются начало (*H*) предыдущей с концом (*K*) последующей обмотки и с фазой сети (рис. 118, *б*). Если предположить, что между точками *A* и *B* включена *I* фаза, между точками *B* и *C* — *II*, а между точками *C* и *A* — *III* фаза, то при схеме «треугольник» соединены: начало *I* (C_1) с концом *III* (C_6), начало *II* (C_2) с концом *I* (C_4) и начало *III* (C_3) с концом *II* (C_5).

У некоторых двигателей концы фаз обмотки выведены на доску зажимов. По ГОСТу, начала и концы обмоток выводят в том порядке, как это показано на рисунке 118, *в*. Если теперь необходимо соединить обмотки по схеме Y, зажимы, на которые выведены концы (или начала), замыкают между собой, а к зажимам, на которые выведены начала (или концы), присоединяют фазы сети. При соединении обмоток в △ соединяют зажимы по вертикали попарно и к перемычкам присоединяют фазы сети. Вертикальные перемычки соединяют начало *I* с концом *III* фазы, начало *II* с концом *I* фазы и начало *III* с концом *II* фазы. При определении схемы соединения обмоток можно пользоваться следующей таблицей:

Напряжение, указанное в паспорте электродвигателя (*в*)	Напряжение в сети (*в*)		
	127	220	380
127/220	△	Y	—
220/380	—	△	Y
380/ —	—	—	△

На выводах статорных обмоток обычно имеются стандартные обозначения на металлических обжимающих кольцах. Однако эти обжимающие кольца теряются. Тогда возникает необходимость определить согласованные выводы. Это выполняют в такой последовательности.

Сначала при помощи контрольной лампы определяют пары выводов, принадлежащих отдельным фазным обмоткам (рис. 119). К зажиму сети *2* подключают один из шести выводов статорной обмотки двигателя, а к другому зажиму сети *3* подключают один конец контрольной лампы *КЛ*. Другим концом контрольной лампы поочередно касаются каждого из остальных пяти выводов статорных обмоток до тех пор, пока лампа не загорится. Если лампа загорелась, значит, два вывода, присоединенные к сети, принадлежат одной фазе. Необходимо следить при этом, чтобы

выводы обмоток не замыкались друг с другом. Каждую пару выводов помечают (например, завязав ее узелком).

Определив фазы статорной обмотки, приступают ко второй части работы — определению согласованных выводов или «начал» и «концов». Эта часть работы может быть выполнена двумя способами.

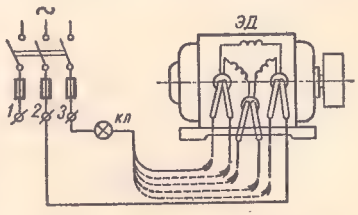


Рис. 119. Определение фазных обмоток при помощи контрольной лампы *КЛ*.

I. Способ трансформации. В одну из фаз включают контрольную лампу *КЛ*. Две другие фазы соединяют последовательно и включают в сеть на фазное напряжение. Если эти две фазы оказались включенными так, что в точке *О* условный «конец» одной фазы соединен с условным «началом» другой (рис. 120, *а*), то магнитный поток $\Sigma\Phi$ пересекает третью обмотку и индуктирует в ней

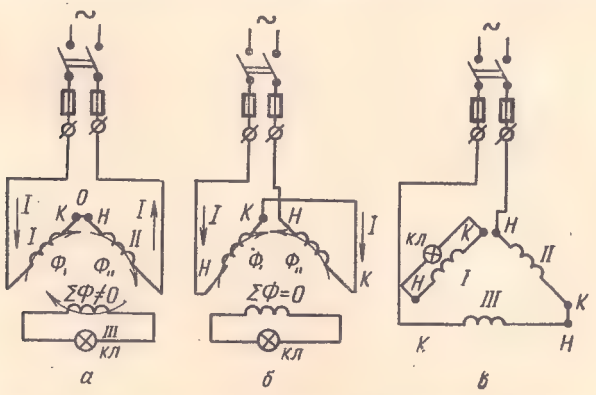


Рис. 120. Определение «начал» и «концов» в фазных обмотках методом трансформации.

э. д. с. Лампа укажет наличие э. д. с. небольшим накалом. Если накал незаметен, то следует применить в качестве индикатора вольтметр со шкалой до 30—60 *в*.

Если в точке *О* встретятся, например, условные «концы» обмоток (рис. 120, *б*), то магнитные потоки обмоток

будут направлены противоположно друг другу. Суммарный поток будет близок к нулю, и лампа не даст накала (вольтметр покажет *О*). В данном случае выводы, принадлежащие какой-либо из фаз, следует поменять местами и включить снова. Если накал у лампы есть (или вольтметр показывает некоторое напряжение), то концы следует пометить. На один из выводов, которые встретились в общей точке *О*, надевают бирку с пометкой H_1 (начало *I* фазы), а на другой вывод — K_3 (или K_2). Бирки K_1 и H_3 (или H_2) надевают на выводы, находящиеся в общих узелках (завязанных при выполнении первой части работы) с H_1 и K_3 соответственно.

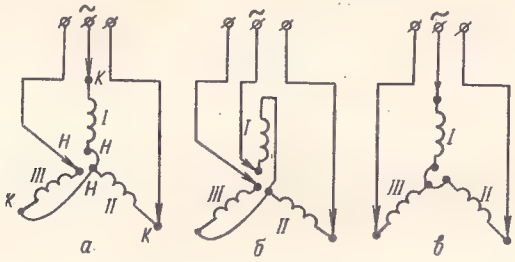


Рис. 121. Определение «начал» и «концов» методом подбора схемы «звезда».

Для определения согласованных выводов третьей обмотки собирают схему, представленную на рисунке 120, *в*. Лампу включают в одну из фаз с уже обозначенными выводами.

II. Способ подбора фаз. Его можно рекомендовать для двигателей небольшой мощности — до 3—5 *квт*. После того как определены выводы отдельных фаз, их наугад соединяют в звезду (по одному выводу от фазы подключают к сети, а по одному — соединяют в общую точку) и включают двигатель в сеть. Если в общую точку попали все условные «начала» или все «концы», то двигатель будет работать нормально. Но если одна из фаз (*III*) оказалась «перевернутой» (рис. 121, *а*), то двигатель сильно гудит, хотя и может вращаться (но легко может быть заторможен). В этом случае выводы любой из обмоток наугад (например, *I*) следует поменять местами (рис. 121, *б*). Если двигатель опять гудит и плохо работает, то фазу следует снова включить, как прежде (как в

схеме *а*), но повернуть другую фазу — *III* (рис. 121, *в*). Если двигатель и после этого гудит, то эту фазу следует также поставить по-прежнему, а повернуть следующую фазу — *II*.

Когда двигатель станет работать нормально (рис. 121, *в*), все три вывода, которые соединены в общую точку, следует пометить одинаково, например «концами», а противоположные — «началами». После этого можно собирать рабочую схему, указанную в паспорте.

§ 4. Ток, потребляемый двигателем из сети. Пуск электродвигателя с переключением обмоток статора со звезды на треугольник

В паспорте указан ток при номинальной нагрузке на валу двигателя. Если, например, указано 13,8/8 *а*, то это означает, что при включении двигателя в сеть 220 *в* и при номинальной нагрузке ток, потребляемый из сети, будет равен 13,8 *а*. При включении в сеть 380 *в* из сети будет потребляться ток 8 *а*, то есть справедливо равенство мощностей: $\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 8 = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 13{,}8$.

При холостом ходе электродвигателя из сети потребляется незначительный ток. При увеличении нагрузки увеличивается и потребляемый ток. С увеличением тока повышается нагрев обмоток. Большая перегрузка приводит к тому, что увеличенный ток вызывает перегрев обмоток двигателя, и возникает опасность обугливания изоляции (сгорания электродвигателя).

В момент пуска из сети потребляется так называемый пусковой ток, который может быть в 3—8 раз больше номинального. Характер изменения тока представлен на графике (рис. 122, *а*). Большой пусковой ток, на который сеть обычно не рассчитана, вызывает значительные снижения напряжения в сети (рис. 122, *б*).

Если принять сопротивление проводов, идущих от источника до двигателя, равным 0,5 *ом*, номинальный ток $I_н = 15$ *а*, а пусковой ток равным пятикратному от номинального, то потери напряжения в проводах в момент пуска составят $0{,}5 \cdot 75 + 0{,}5 \cdot 75 = 75$ *в*. На зажимах двигателя, а также и на зажимах рядом работающих электродвигателей будет $220 - 75 = 145$ *в*. Такое снижение напряжения может вызвать торможение работающих двигателей, что повлечет за собой еще большее увеличение тока в сети и

перегорание предохранителей. В электрических лампах в моменты пуска двигателей уменьшается накал (лампы «мигают»). Поэтому при пуске электродвигателей стре-

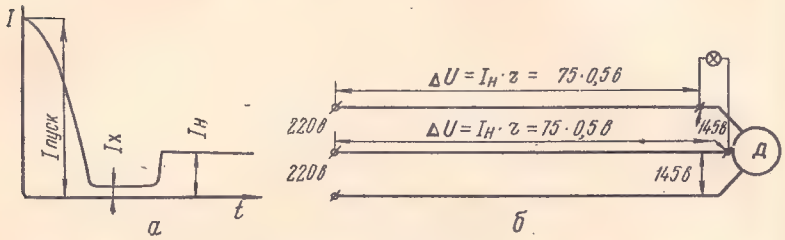


Рис. 122. Характер изменения тока, потребляемого двигателем из сети (*а*), и влияние большого тока на колебания напряжения в сети (*б*).

мятся уменьшить пусковые токи. Существует ряд способов снижения пусковых токов.

Пуск двигателя с переключением обмоток статора со Y на Δ применим в тех случаях, когда напряжение сети соответствует меньшему напряжению, указанному в паспорте двигателя. Как видно из схемы (рис. 123), при нижнем положении переключателя *ЗТ* обмотки электродвигателя будут включены по схеме «звезда», так как все три начала (C_1, C_2, C_3) обмоток окажутся включенными в одну общую точку *О* и к фазам сети присоединены три конца (C_4, C_5, C_6). Если теперь ножи переключателя *ЗТ* перевести в верхнее положение, то они соединят начала всех предыдущих фаз с концами последующих и с сетью, то есть будет составлена схема «треугольник».

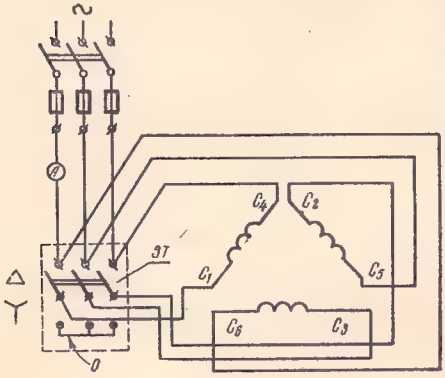


Рис. 123. Схема пуска электродвигателя с переключением обмоток статора со звезды на треугольник:
ЗТ — переключатель со звезды на треугольник.

Включая обмотки двигателя в схему $\curlyvee$ в момент пуска вместо предназначенной для данного напряжения в сети схемы $\triangle$, уменьшают напряжение, приходящееся на каждую фазную обмотку, в $\sqrt{3}$ раз, а потребляемый из сети ток I_c уменьшается в 3 раза:

$$I_{c\curlyvee} = I_{\phi\curlyvee} = \frac{I_{\phi\triangle}}{\sqrt{3}} = \frac{I_{c\triangle}}{3}. \qquad (170)$$

Снижается также в 3 раза и мощность, развиваемая электродвигателем при пуске. Это—недостаток данного способа, поскольку двигатель может быть пущен только при нагрузке не более $^1/_3$ номинальной.

В тех случаях, когда рабочие машины потребляют мощность от 10 *квт* и более и имеют большие маховые массы (мельничные жернова, пилорамы, сложные молотилки), рекомендуется использовать трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором.

§ 5. Устройство и схема включения двигателя с фазным ротором

Двигатель с фазным ротором называют также двигателем с контактными кольцами (рис. 124). Статорная обмотка двигателя с фазным ротором по своему исполнению не отличается от статорной обмотки короткозамкнутого электродвигателя. Она также может быть соединена, в зависимости от напряжения сети, как в звезду, так и в треугольник. Основное отличие данного двигателя от короткозамкнутого — в устройстве ротора, который имеет трехфазную обмотку, выполненную изолированным проводом и соединенную в большинстве случаев по схеме «звезда». Концы обмоток ротора соединяют с контактными кольцами, изолированными друг от друга. На кольца накладывают скользящие угольные или медно-графитные щетки, при помощи которых в цепь обмоток ротора включается дополнительное сопротивление пускового реостата R. В момент включения электродвигателя в сеть дополнительное сопротивление реостата включено полностью в цепь обмоток ротора, что увеличивает общее сопротивление цепи его обмоток. При включении в сеть двигателя с фазным ротором ток, потребляемый из сети, меньше, чем при включении короткозамкнутого электродвигателя такой же мощности.

Порядок операций при пуске двигателя с фазным ротором следующий.

1. Проверяют, лежат ли щетки на кольцах.

2. Проверяют, введен ли реостат (рукояткой против часовой стрелки до отказа).

3. Включают рубильник.

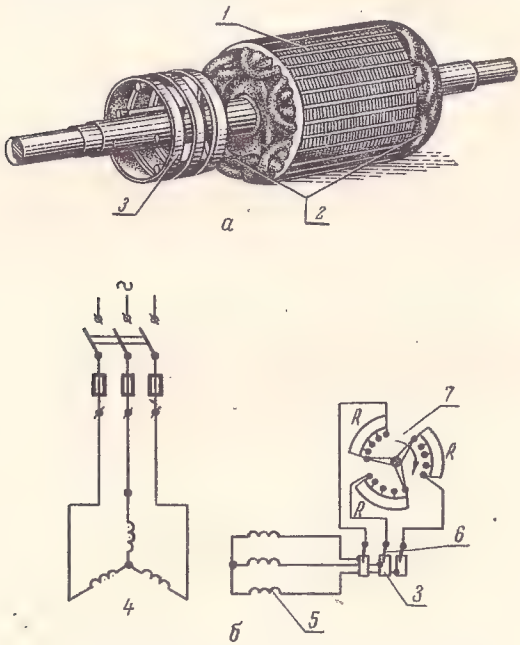


Рис. 124. Двигатель с фазным ротором:

а — устройство ротора; *б* — схема включения двигателя; *1* — сердечник; *2* — обмотка; *3* — кольца; *4* — обмотка статора; *5* — обмотка ротора; *6* — щетки; *7* — реостат, состоящий из трех сопротивлений *R*, соединенных в звезду.

4. Постепенно, по мере увеличения числа оборотов, выводят реостат. При этом обмотки ротора замыкаются накоротко, и он работает как короткозамкнутый.

5. Поднимают щетки, если для этого имеется приспособление (при этом кольца замыкаются накоротко). Реостат после этого можно ввести, приготовив его к следующему пуску.

Порядок операций по выключению двигателя следующий.

1. Выключают рубильник.
2. Вводят реостат.
3. Опускают щетки на кольца.

Двигатели с фазным ротором изготовляют в основном мощностью от 10 *квт* и выше. Их преимущества в том, что пусковые токи не превышают 1,2—2,5 номинального. Скорость вращения при пуске увеличивается плавно.

Однако двигатель с фазным ротором дороже двигателя с короткозамкнутым ротором примерно на 35% и требует более квалифицированного обслуживания. Неосторожное обращение с ним и несоблюдение последовательности операций может привести к перегоранию предохранителей из-за больших пусковых токов. Если реостат не выведен после пуска, он может перегореть.

Если замкнуть кольца ротора между собой, то двигатель можно эксплуатировать как с короткозамкнутым ротором, но при больших пусковых токах.

§ 6. Скорость вращения асинхронного электродвигателя. Мощность и к. п. д. двигателя. Коэффициент мощности ($\cos\varphi$)

В паспорте указаны обороты ротора, которые двигатель развивает при номинальных значениях мощности и напряжения. Если двигатель работает вхолостую, скорость вращения ротора приближается к скорости вращения магнитного поля. При перегрузке двигателя обороты ротора уменьшаются, а ток растет.

Величина, которая характеризует отставание скорости вращения ротора от скорости вращения магнитного поля, называется с к о л ь ж е н и е м. Она обычно выражается в процентах и определяется так:

$$S = \frac{n_{мп} - n_{рот}}{n_{мп}} \cdot 100\%, \qquad (171)$$

где S — скольжение (%);

$n_{мп}$ и $n_{рот}$ — соответственно скорость вращения магнитного поля и ротора.

Для двигателей единой серии скольжение находится в пределах от 2 до 10%.

В паспорте указана номинальная мощность. В отличие от этой мощности потребляемая из сети (присоединенная) мощность

$$P_{\text{прис}} = \sqrt{3} UI \cos \varphi, \qquad (172)$$

где U — напряжение;

I — сила тока, соответствующая номинальной нагрузке;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности при номинальной нагрузке (см. ниже).

Коэффициент полезного действия определяется так:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{прис}}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3}\, UI \cos \varphi}. \qquad (173)$$

У большинства двигателей к. п. д. указан в паспорте.

Мощность приблизительно прямо пропорциональна величине тока, потребляемого из сети. Если мощность, то есть нагрузка двигателя, возрастет, то увеличится ток. А чем больше ток, тем сильнее нагревается электродвигатель. Нельзя перегружать двигатель до такой степени, чтобы его нагрев вышел из нормы и вызвал старение изоляции обмоток. Принято, что указанная в паспорте мощность может быть получена при окружающей температуре, равной 35°. Допустимая нагрузка может меняться в некоторых пределах в зависимости от изменения окружающей температуры. Ниже указаны допустимые нагрузки при различной окружающей температуре, большей 35°.

$t_{\text{окр}}$	35°	40°	45°	50°
Нагрузка, в % от $P_{\text{н}}$ . . .	100	95	87,5	75

К о э ф ф и ц и е н т м о щ н о с т и — это отношение активной мощности, идущей на полезную работу, нагрев стали и обмоток двигателя, в *вт* или *квт*, к полной мощности, потребляемой двигателем из сети, в *ва* или *ква*:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI_{\text{а}}}{UI_{\text{с}}} = \frac{I_{\text{а}}}{I_{\text{с}}},$$

где $I_{\text{а}}$ — активный ток, пропорциональный нагрузке двигателя;

I_c — полный ток, потребляемый двигателем из сети и расходуемый на образование магнитного поля, на нагрев двигателя и на преодоление нагрузки на двигатель. Этот ток можно представить так:

$$I_c = \sqrt{I_p^2 + I_a^2},$$

I_p — реактивный или намагничивающий ток двигателя.

Соотношения между полным, активным и реактивным токами в зависимости от нагрузки двигателя можно проанализировать при помощи векторной диаграммы (рис. 125).

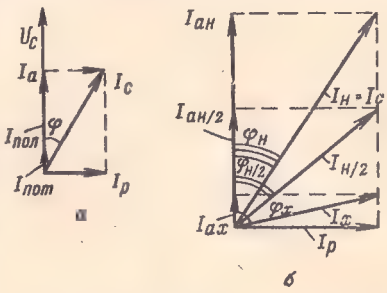


Рис. 125. Векторная диаграмма токов, потребляемых электродвигателем из сети (*а*), и изменение угла φ в зависимости от нагрузки на электродвигатель (*б*):
$I_н$ — ток при полной нагрузке; $I_{н/2}$ — ток при половинной нагрузке; I_x — ток холостого хода.

Реактивный, или намагничивающий, ток I_p в зависимости от нагрузки почти не меняется по величине. Активный же ток пропорционален нагрузке двигателя. Поэтому величина коэффициента мощности в значительной мере зависит от нагрузки. Так, при холостом ходе $\cos\varphi = 0{,}2 \div 0{,}3$, в зависимости от мощности, а при номинальной нагрузке $\cos\varphi = 0{,}7 \div 0{,}95$. Бо́льшие значения относятся к двигателям большей мощности.

Из рисунка 125 видно, что если двигатель работает на холостом ходу (I_x), угол φ — максимальный, а $\cos\varphi$ минимальный. С ростом нагрузки увеличивается сила активного тока и уменьшается угол φ, а следовательно, возрастает $\cos\varphi$. Для рассматриваемых на диаграмме положений: холостой ход I_x, половина номинальной нагрузки $I_{н/2}$ и номинальная нагрузка $I_н$

$$\cos\varphi_x < \cos\varphi_{н/2} < \cos\varphi_н.$$

Предположим, что для привода машины электродвигатель выбран правильно. Мощность, которую требует

машина, обеспечивается силой активного тока $I_{ан}$. Полный ток, потребляемый из сети, $I_н$ и $\cos \varphi_н$.

Если для этой машины взять электродвигатель мощностью в несколько раз больше, чем требуется, сила реактивного тока будет примерно во столько же раз больше, чем в предыдущем случае. Сила потребляемого из сети полного тока во втором случае будет значительно больше, чем в первом, а $\cos \varphi_2$ во втором случае будет значительно меньше.

Если сила тока, потребляемого из сети, увеличится в 2 раза, то потери в линии возрастут в 4 раза, так как потери определяются как $I_с^2 R$, где $I_с$ — сила тока в сети, R — сопротивление проводов. Этот ток вызывает потери также в трансформаторе, генераторе. Мощность источника электроснабжения используется при этом нерационально.

Для стимулирования борьбы на предприятиях за высокий $\cos \varphi$ стоимость электроэнергии поставили в зависимость от его величины. Если $\cos \varphi$ больше 0,9, электроэнергию отпускают по более дешевой цене. Если $\cos \varphi$ ниже 0,9, стоимость энергии возрастает по мере его снижения.

На векторной диаграмме можно также показать различие между коэффициентом мощности и коэффициентом полезного действия. Так, если $\cos \varphi$ есть отношение $\frac{I_а}{I_с}$, то к. п. д. может быть найден так:

$$\eta = \frac{I_{пол}}{I_а} = \frac{I_{пол}}{I_{пол} + I_{пот}},$$

где $I_а = I_{пол} + I_{пот}$, то есть активный ток равен сумме токов, расходуемых на полезную нагрузку ($I_{пол}$) и тепловые потери ($I_{пот}$).

§ 7. Вращающий момент двигателя. Усилие на валу

По паспортным данным электродвигателя можно определить его вращающий момент и усилие, развиваемое на шкиве. На рисунке 126 показано, как приложено усилие в виде пары сил F к вращающемуся шкиву радиусом r. Вращающий момент $M_{вр}$ — мера этого усилия, изменяющего угловую скорость

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \qquad (174)$$

где n — число оборотов двигателя.

Между мощностью двигателя P, угловой скоростью ω, силой F, радиусом шкива r и вращающим моментом $M_{вр}$ существует следующая зависимость:

$$M_{вр} = \frac{P}{\omega} = Fr. \qquad (175)$$

Подставив в (175) значение угловой скорости ω из (174), получим:

$$M_{вр} = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{60P}{2\pi n} = 9{,}554\,\frac{P}{n}, \qquad (176)$$

где $M_{вр}$ — вращающий момент ($н \cdot м$);
P — мощность двигателя из паспорта ($вт$);
2π — $2 \cdot 3{,}14 = 6{,}28$;
n — число оборотов в минуту.

Кроме того,

$$M_{вр} = Fr,$$

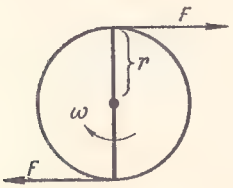


Рис. 126. Пара сил, действующих на шкив.

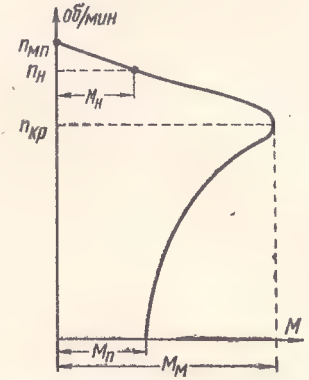


Рис. 127. Изменение момента асинхронного двигателя в зависимости от оборотов: $M_п$ — пусковой момент; $M_м$ — максимальный момент; $n_{кр}$ — критические обороты ротора; $n_н$ — номинальные обороты ротора; $n_{мп}$ — обороты магнитного поля (синхронные обороты).

где F — одна из сил пары, приложенной к шкиву ($н$);
r — радиус шкива ($м$).

Вращающий момент асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором изменяется в зависимости от оборотов ротора по кривой, представленной на рисунке 127. На этой кривой отмечены три частных, имеющих практическое значение, величины вращающего момента двигателя: номинальный вращающий момент $M_н$, развиваемый двигателем при номинальных оборотах (номинальной нагрузке в установившемся режиме работы); пусковой вращающий

момент $M_п$, развиваемый двигателем при пуске ($n=0$); максимальный вращающий момент $M_м$, развиваемый двигателем при оборотах меньше номинальных, называемых критическими ($n_к$). Максимальный момент определяет перегрузочную способность электродвигателя. При перегрузке выше максимального момента двигатель, снижая обороты ниже $n_{кр}$, входит в неустойчивый режим работы и останавливается. Устойчивый режим работы двигателя в области от $n_{м.п}$ до $n_{кр}$ можно восстановить, лишь сняв часть нагрузки со шкива. Пусковой вращающий момент характеризует способность двигателя брать нагрузку с места. Максимальный вращающий момент — способность двигателя преодолевать временные перегрузки при работе. В каталожных данных на двигатели обычно заданы отношения $M_п : M_н$ и $M_м : M_н$. Для большинства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором отношение пускового момента к номинальному составляет 1,1—1,5. У отдельных двигателей оно равно 1,9 и даже 2, а у двигателей типа АОС и АОП находится в пределах 2,3—2,8.

Отношение максимального момента к номинальному для разных типов асинхронных двигателей находится в пределах от 2 до 3 и более, то есть электродвигатель способен преодолевать двукратные и трехкратные временные перегрузки.

Пример. Определить номинальный, пусковой и максимальный вращающий моменты для двигателя АО2-51-2, $P=10$ *квт*, $n=2930$ *об/мин*. Из каталога известно, что $M_п : M_н=1,6$, а $M_м : M_н=3,1$. Определить также силу F, обеспечиваемую двигателем на шкиве радиусом $r=0,2$ *м* и на шкиве радиусом $r=0,1$ *м*. Номинальный вращающий момент

$$M_н = 9554\frac{P}{n} = 9554\frac{10}{2930} = 32,6 \text{ н·м}.$$

Пусковой вращающий момент

$$M_п = 1,6M_н = 1,6 \cdot 32,6 = 52,1 \text{ н·м}$$

Максимальный вращающий момент

$$M_м = 3,1M_н = 3,1 \cdot 32,6 = 101 \text{ н·м}.$$

Сила F при номинальных оборотах и радиусе шкива 0,2 *м*

$$F_{0,2} = \frac{M_н}{r} = \frac{32,6}{0,2} = 163 \text{ н}.$$

Сила при номинальных оборотах и радиусе шкива 0,1 *м*

$$F_{0,1} = \frac{32,6}{0,1} = 326 \text{ н}.$$

§ 8. Однофазный асинхронный двигатель. Включение трехфазного двигателя в однофазную сеть

Однофазный асинхронный двигатель предназначен для работы в сети однофазного переменного тока. Принципиальная схема включения однофазного двигателя представлена на рисунке 128, *а*. В пазах железа укладывается одна обмотка, если двигатель не имеет пусковых приспо-

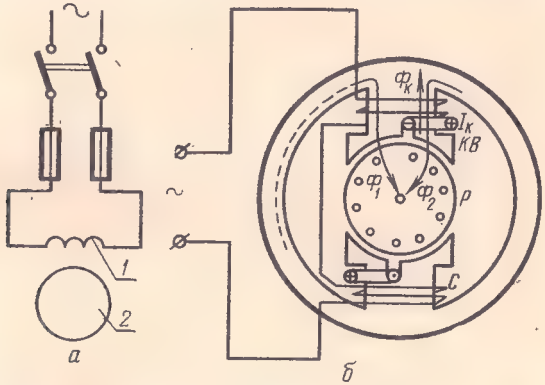


Рис. 128. Схема включения однофазного асинхронного электродвигателя (*а*) и однофазный двигатель с расщепленными полюсами (*б*):

1 — обмотка статора; *2* — ротор; *С* — обмотка статора; *Р* — короткозамкнутая обмотка ротора; *КВ* — короткозамкнутые витки; $Ф_к$ — магнитный поток короткозамкнутых витков; $Ф_1$ и $Ф_2$ — сдвинутые в пространстве и во времени магнитные потоки, образующие пусковой и вращающие моменты.

соблений. Ротор по своему устройству аналогичен ротору трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя. Двигатель с одной рабочей обмоткой в пазах статора в момент пуска не может начать вращение без посторонней силы, так как одна обмотка, включенная на однофазное напряжение, создает пульсирующее магнитное поле. Направление вращения ротора будет зависеть от того, в какую сторону ему сообщить начальную скорость.

Для того чтобы двигатель сам развил первоначальный момент с определенным направлением вращения и привел в действие рабочую машину, полюса статора выполняют расщепленными и на части полюсов укладывают коротко-

замкнутые витки (рис. 128, *б*). Магнитное поле, которое охватывается витками, индуктирует в них ток $I_к$. Этот ток создает магнитный поток, направленный навстречу основному потоку, и ослабляет его. Общий поток под полюсами делится таким образом на две части, сдвинутые по времени (фазе) и в пространстве. Возникает вращающееся эллиптическое поле, создающее пусковой и вращающий моменты электродвигателя. Мощность таких двигателей до 100 *вт*. Вращение одностороннее. У двигателей большей мощности в пазах статора укладывается дополнительная пусковая обмотка (рис. 129). В цепь вспомогательной обмотки может быть включено активное, индуктивное или емкостное сопротивление. Наиболее распространен однофазный двигатель с конденсатором C в цепи вспомогательной обмотки. Его называют однофазным конденсаторным двигателем. Вспомогательная пусковая обмотка позволяет получить вращающееся магнитное поле с достаточным усилием для трогания машины в момент пуска.

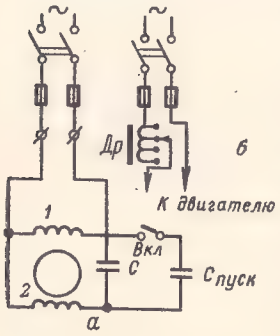


Рис. 129. Конденсаторный электродвигатель:
а — схема двигателя; *б* — последовательное включение дросселя с отпайками; *1* — основная обмотка статора; *2* — вспомогательная обмотка статора; *С* — рабочий конденсатор; *Вкл* — выключатель пускового конденсатора $C_{пуск}$; *Др* — дроссель.

Пусковой момент конденсаторного двигателя значительно больше момента двигателя с активным или индуктивным сопротивлением в цепи вспомогательной обмотки. Cos φ однофазного конденсаторного двигателя может быть близким по величине к единице. Величину емкости конденсатора подбирают таким образом, чтобы ток во вспомогательной обмотке был сдвинут по фазе относительно тока в основной обмотке приблизительно на угол 90°. Тогда максимум магнитного поля в основной и вспомогательной обмотках наступает неодновременно. А соответствующее соединение обмоток обеспечивает явно выраженное направление вращения магнитного поля при пуске.

Величина пускового момента двигателя и развиваемой им мощности зависит от величины емкости. Однако при слишком большой емкости возрастает ток вспомогательной обмотки, и она перегревается. Поэтому, если нужно полу-

чить большой пусковой момент, используют дополнительную емкость $C_{пуск}$, которая после разбега двигателя отключается. Если требуется получить пусковой момент, равный 45—50% номинального, то емкость конденсатора такова, что двигатель работает длительно, не перегреваясь. Такие двигатели используют для привода насосов вентиляторов, пылесосов и др.

Скорость вращения такого двигателя регулируют изменением подводимого напряжения, например включая секции дросселя *Др*.

Чтобы изменить направление вращения конденсаторного двигателя, необходимо поменять местами концы одной из его обмоток — основной или вспомогательной.

При отсутствии специальных однофазных электродвигателей там, где электроснабжение осуществляется от однофазного трансформатора с вторичным напряжением 2×220 *в*, можно использовать обычные трехфазные асинхронные двигатели 380/220 *в*. Схема включения трехфазного двигателя для работы в качестве однофазного представлена на рисунке 130.

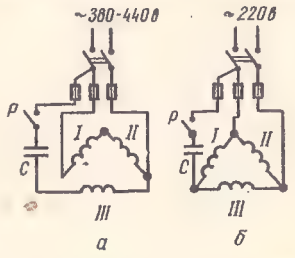


Рис. 130. Схемы включения трехфазного электродвигателя 380/220*в* в однофазную сеть:
а — в сеть 380—440 *в*;
б — в сеть 220 *в*.

Две обмотки *I* и *II* в качестве главной соединяют последовательно и включают в сеть, а обмотку *III* используют как пусковую. Пусковую обмотку можно включать в сеть через емкость *С* или активное сопротивление. При пуске рубильник *Р* замкнут. После того как двигатель наберет обороты, рубильник отключают. Двигатель развивает при этом мощность 50—60% от номинальной в трехфазном режиме. Оставлять конденсаторы *С* или сопротивление *R* включенными недопустимо по тем же соображениям, что и для однофазного двигателя. Наиболее целесообразные величины пусковых емкостей или сопротивлений в зависимости от мощности электродвигателя приведены в таблице 15.

Пусковой момент двигателя при напряжении в сети 440 *в* составляет около 0,4 от номинального момента двигателя в трехфазном режиме.

Таблица 15

Выбор емкости конденсатора или величины сопротивления для пуска трехфазного двигателя от однофазной сети

Мощность электродвигателя (*квт*)	0,6	1,0	1,7	2,8	4,0
Величина емкости (*мкф*): напряжение в сети 380 *в* (рис. 130, *а*)	13	22	38	62	88
напряжение в сети 440 *в* (рис. 130, *а*)	10	16	28	46	65
Величина емкости (*мкф*) при напряжении в сети 220 *в* (рис. 130, *б*)	40	66	110	185	260
Величина пускового сопротивления (*ом*) при отсутствии конденсаторов (для обеих схем по рис. 130)	25—30	20—25	12—15	8—10	5—7

При мощности однофазного трансформатора 5 *ква* можно запускать электродвигатели до 2,8 *квт*, а при мощности трансформатора 10 *ква* — до 4,5 *квт* (в трехфазном режиме).

Сопротивления следует выбирать по пусковому току (в 5 раз больше $I_н$). Однофазные двигатели, а также переоборудованные трехфазные при той же мощности дороже, чем трехфазные, на 50—100%.

§ 9. Эксплуатация электродвигателя и уход за ним. Неисправности и их устранение

При получении двигателя с завода или со склада прежде всего нужно проверить состояние его изоляции. Изоляцию можно считать нормальной, если ее величина

$$R_{из} \geqslant 1000\, U_н \ ом, \qquad (177)$$

где $U_н$ — напряжение в вольтах, на которое рассчитан двигатель.

Если величина сопротивления изоляции меньше, чем указано в равенстве, то двигатель следует просушить. Сушат обмотку двигателей различными способами. Можно использовать посторонние источники тепла: рефлекторы, лампы инфракрасных лучей, вентиляторы, которые подают теплый воздух, и т. д. Для сушки двигателя можно про-

пускать через обмотки ток по величине до 50% от номинального. Для этой цели пользуются автотрансформатором *Amp* (рис. 131). Обмотки двигателя включают последовательно, и, наблюдая величину тока по амперметру, подбирают величину напряжения. Сопротивление изоляции измеряют при этом каждые 2—3 часа. Сушку продолжают до тех пор, пока сопротивление изоляции не установится, то есть останется постоянным в течение 3—4 измерений. Если величина его не будет соответствовать $R_{из}$, определенной по формуле (177), двигатель следует отправить в ремонт.

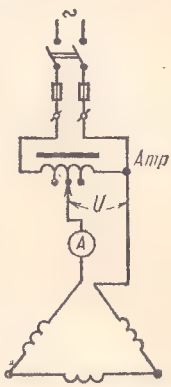


Рис. 131. Схема включения обмоток электродвигателя для сушки его током.

Перед пуском двигателя необходимо проверить схему соединения его обмоток, состояние всех контактов, плавкие вставки, крепление салазок и двигателя. Те части двигателя, которые при отправке с завода были смазаны или покрыты лаком для предохранения от ржавчины, нужно промыть бензином Б-70. Им следует также промыть подшипники и налить в них масло. Необходимо проверить натяжение ремня и провернуть двигатель, чтобы убедиться в отсутствии заеданий.

Во время работы двигателя необходимо следить за его правильной загрузкой, лучше по показаниям амперметра. Если амперметра нет, то следить за нагревом двигателя. Грубо, приближенно нагрев можно контролировать на ощупь. Для этого необходимо, предварительно изолировав себя от земли, например при помощи доски или галош, приложить ладонь к корпусу двигателя. Если рука терпит температуру, следует считать, что двигатель не перегрелся.

Нужно следить также за состоянием контактов рубильника или магнитного пускателя. Ослабленные контакты будут подгорать из-за большого местного переходного сопротивления.

В подшипниках с кольцевой смазкой менять смазку следует через 200—300 часов работы, но не реже чем один раз в 3—5 месяцев. Перед заливкой нового масла старое слить, а подшипник промыть керосином. Нужно использовать машинное масло Л и М и моторное масло М.

Шариковые и роликовые подшипники смазывают через каждые 1000—1500 часов работы, но не реже одного раза в 6 месяцев. Подшипник заполняют при этом на $^2/_3$ свободного пространства. Используют солидол Л и М.

Если двигатель работает на открытом воздухе, его нужно на ночь закрывать брезентом.

При первом пуске могут встретиться следующие неполадки.

1. Двигатель вращается в обратном направлении. Для изменения направления вращения следует поменять местами две фазы сети или двигателя.

2. Двигатель неестественно гудит, нагревается на холостом ходу; потребляемый из сети ток больше номинального. Это может быть при ошибочном соединении схемы. Необходимо проверить, правильно ли обозначены начала и концы обмоток.

3. Двигатель не берет с места нагрузку, нормально гудит при этом. Возможные причины: пониженное напряжение в сети, очень сильно затянут ремень, сгорел предохранитель. Напряжение проверить вольтметром. Ослабить натяжение ремня, заменить предохранитель. Если все в порядке, помочь двигателю взять с места путем предварительного раскручивания вручную или установить рабочую машину в такое положение, при котором во время включения двигателя момент ее сопротивления был бы минимальным.

4. Двигатель при пуске гудит, а затем останавливается. Причина может быть в том, что предохранители, которые не были рассчитаны на данную нагрузку, перегорели.

5. При пуске двигателя с фазным ротором под нагрузкой пусковой реостат сильно нагревается. Причина в том, что пусковой реостат мал для данных условий пуска. Следует уменьшить нагрузку в момент пуска или установить новый реостат.

6. Двигатель перегревается в работе — мощность двигателя недостаточна для данной машины.

7. Сильно нагреваются подшипники — сильно затянут ремень или плохая смазка.

В процессе эксплуатации двигателя могут быть следующие неисправности.

1. Двигатель не берет нагрузку с места и сильно гудит. Причиной может быть неисправность предохранителя, пло-

хой контакт в силовой цепи у рубильника или на щитке двигателя, разрыв в цепи обмотки двигателя.

2. Двигатель тяжело запускается, быстро нагревается, при пуске гудит. Это возможно из-за неисправных подшипников. Они выплавлены или сильно сработаны. Ротор заедает в подшипниках.

3. При включении перегорают предохранители. Причина — короткое замыкание в обмотках двигателя или в подводящих проводах. У асинхронного двигателя с кольцами возможно замыкание на кольцах.

4. Двигатель разбегается рывками, в процессе работы амперметр, включенный в цепь статорной обмотки, показывает резкое колебание тока. Неисправность заключается в том, что в цепи пускового реостата и ротора имеется плохой контакт.

5. При пуске в ход асинхронного двигателя с переключателем со звезды на треугольник двигатель не разбегается. Возможная причина — подгорели контакты в переключателе, или нагрузка при пуске составляет более 30% $P_н$, или неправильно собрана схема.

§ 10. Многоскоростные асинхронные электродвигатели

В ряде установок, которые требуют изменения скорости вращения, применяются асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов. Как отмечалось выше, обороты асинхронного двигателя

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s) = \frac{3000}{p}(1 - s),$$

где p — число пар полюсов в каждой из фазных обмоток;
s — скольжение.

Можно выполнить обмотку таким образом, что число пар полюсов путем переключения секций обмотки будет меняться, соответственно изменятся и обороты двигателя.

У двухскоростных двигателей обмотка каждой фазы состоит из двух одинаковых частей, в одной из которых направление тока меняется при переключении частей обмоток с параллельного на последовательное соединение. Принцип изменения числа пар полюсов показан на рисунке 132. На рисунке 132, *а* обе части обмотки фазы соединены последовательно. Как показывает направление тока

в витках, в данном случае число пар полюсов p равно 2. При параллельном соединении частей обмоток (рис. 132, *б*) число пар полюсов равно 1. В практике возможны следующие схемы переключения (рис. 133): со звезды (*а*) на двойную звезду (*б*) и с треугольника (*в*) на двойную звезду (*г*). Если обозначить мощность, которую потребляет двигатель при соединении звездой, через P_1, мощность при

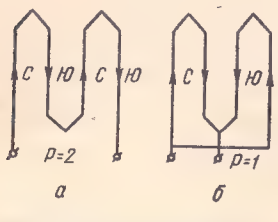


Рис. 132. Переключение элементов обмотки с $p=2$ на $p=1$.

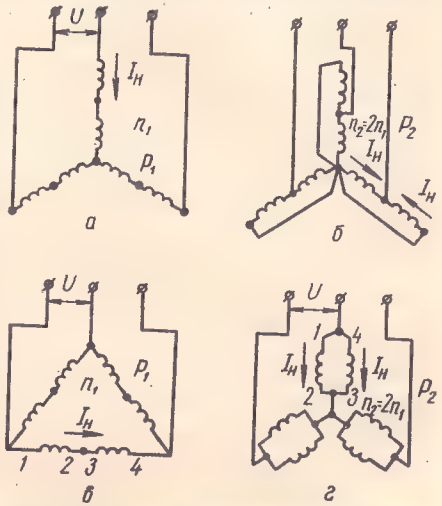


Рис. 133. Схемы переключения со звезды на двойную звезду (*а* и *б*) и с треугольника на двойную звезду (*в* и *г*).

соединении двойной звездой P_2, допустимый ток $I_н$ и принять, что $\cos\varphi_1=\cos\varphi_2$, то

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{3I_н\dfrac{U}{\sqrt{3}}\cos\varphi_1\eta_1}{3\cdot 2I_н\dfrac{U}{\sqrt{3}}\cos\varphi_2\eta_2}=\frac{1}{2}. \qquad (178)$$

Отношение моментов

$$\frac{M_1}{M_2}=\frac{P_1n_2}{P_2n_1}=\frac{1}{2}\cdot\frac{2}{1}=1. \qquad (179)$$

Следовательно, при этом способе регулирования скорости момент остается постоянным.

Если обозначить мощности, которые потребляет электродвигатель при соединении треугольником, как P_1, а при соединении двойной звездой — как P_2, получим:

$$\frac{P_1}{P_2}=\frac{3I_нU\cos\varphi_1\eta_1}{3\cdot 2I_н\dfrac{U}{\sqrt{3}}\cos\varphi_2\eta_2}=\frac{\sqrt{3}}{2}=0{,}86. \qquad (180)$$

При таком регулировании мощность изменится на 14%, а момент в $\sqrt{3}$ раз.

Таким образом, можно заключить, что схему переключения со звезды на двойную звезду целесообразно применять там, где скорость регулируется при постоянном моменте, например в подъемных механизмах, а схему переключения с треугольника на двойную звезду — при регулировании скорости на станках, где требуется постоянная мощность.

Двигатели АО2 на 2, 3 и 4 скорости вращения имеют соответственно в обозначении две, три и четыре цифры, указывающие число полюсов. Так, двухскоростной двигатель АО2-11-4/2 мощностью 0,43 *квт* в зависимости от схемы переключения обмоток имеет число оборотов 1400 или 2700 в минуту. Двигатель АО2-31-6/4/2 имеет три скорости: 960 *об/мин*, мощность при этом равна 0,75 *квт*; 1455 *об/мин*, 0,9 *квт*; 2875 *об/мин*, 1,2 *квт*. Двигатель АО2-61-12/8/6/4 имеет обороты и мощность соответственно: 460 *об/мин*, 1,6 *квт*; 910 *об/мин*, 3,2 *квт*; 690 *об/мин*, 3,2 *квт*; 1410 *об/мин*, 5 *квт*.

§ 11. Асинхронные генераторы

Если асинхронный двигатель привести во вращение от какого-либо первичного двигателя, то при достижении синхронных оборотов на зажимах статорной обмотки в ре-

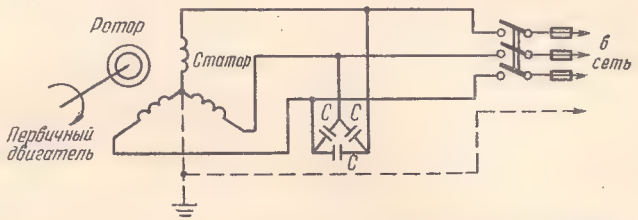


Рис. 134. Схема включения асинхронного генератора (асинхронного короткозамкнутого двигателя в качестве генератора).

зультате остаточного магнетизма появится некоторая э.д.с. Если к зажимам статорной обмотки подключить конденсаторы *С* (рис. 134), то под действием появившейся э. д. с. в обмотках статора потечет опережающий емкостный ток,

являющийся в данном случае намагничивающим. Под его действием по принципу самовозбуждения будет расти генерируемая э. д. с. Величина этой э. д. с. зависит в конечном счете от характеристики машины и емкости конденсаторов.

Можно подобрать емкость таким образом, чтобы номинальное напряжение и мощность асинхронного генератора равнялись соответственно напряжению и мощности при работе его в качестве электродвигателя.

В таблице 16 приведены емкости конденсаторов для возбуждения асинхронных генераторов 380 *в*, 750—1500 *об/мин*.

Таблица 16

Выбор емкости конденсаторов к асинхронным генераторам

Мощность генератора (*ква*)	Холостой ход		Полная нагрузка			
			$\cos\varphi = 1$		$\cos\varphi = 0{,}8$	
	емкость (*мкф*)	реактивная мощность (*квар*)	емкость (*мкф*)	реактивная мощность (*квар*)	емкость (*мкф*)	реактивная мощность (*квар*)
2,0	28	1,27	36	1,63	60	2,72
3,5	45	2,04	56	2,54	100	4,53
5,0	60	2,72	75	3,40	138	6,25
7,0	74	3,36	98	4,44	182	8,25
10,0	92	4,18	130	5,90	245	11,1
15,0	120	5,44	172	7,80	342	15,5

Реактивная мощность Q определена по формуле

$$Q = 0{,}314U^2C \cdot 10^{-6},$$

где C — емкость конденсаторов (*мкф*).

Как видно из приведенных данных, индуктивная нагрузка на асинхронный генератор, понижающая коэффициент мощности, вызывает резкое увеличение потребной емкости. Для поддержания напряжения постоянным с увеличением нагрузки необходимо увеличивать и емкость конденсаторов. Это достигается путем подключения дополнительных конденсаторов при увеличении нагрузки.

Генератор должен работать с числом оборотов выше синхронных на 5—10%. Преимущества асинхронного генератора состоят в том, что используется обычный электродвигатель без каких-либо переделок. При параллельной работе с синхронным генератором (см. гл. XII, § 3) нет необходимости в синхронизации. При этом мож-

но обойтись без конденсаторов. Недостаток асинхронных генераторов в том, что при изолированной их работе требуются дорогостоящие конденсаторы. Применять асинхронные генераторы мощностью выше 15—20 *ква* нецелесообразно.

§ 12. Асинхронный преобразователь частоты. Асинхронные муфты скольжения

На рисунке 135 представлена схема преобразователя частоты И75В, который преобразует сетевой трехфазный ток 50 *гц* в трехфазный ток повышенной частоты 200 *гц*.

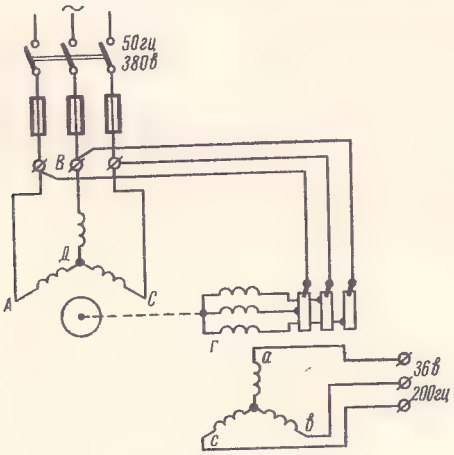


Рис. 135. Схема преобразователя частоты И75В.

Первичный двигатель — трехфазный асинхронный короткозамкнутый — делает 3000 *об/мин*. В общем корпусе с двигателем расположен шестиполюсный преобразователь частоты, представляющий собой по конструкции асинхронный двигатель с фазным ротором, работающий в режиме генератора-преобразователя. Ротор преобразователя — трехфазный, он расположен на одном валу с ротором первичного двигателя и вращается, следовательно, с числом оборотов 3000 в минуту. Но обмотка ротора преобразователя включена в сеть таким образом, что ее магнитное поле вращается в обратную сторону по отношению к

вращению самого ротора. Обмотка статора преобразователя шестиполюсная, то есть $p = 3$. Поэтому в ней наводится э. д. с. с частотой

$$f = \frac{(n_р + n_{м.п})p}{60} = \frac{(3000 + 1000)\,3}{60} = 200 \text{ гц},$$

где $n_р$ — обороты ротора, которые складываются с $n_{м.п}$ — оборотами магнитного поля обмотки ротора;
p — число пар полюсов обмотки статора преобразователя.

В преобразователе И75 мощность первичного двигателя 4,5 *квт*, а вторичную сторону (36 *в* и 200 *гц*) можно нагружать мощностью до 3,5 *ква*. В ранее выпускавшихся преобразователях И75А и И75Б на напряжение сети 50 *гц* включали шестиполюсную обмотку статора, а напряжение 36 *в* 200 *гц* снимали с колец ротора.

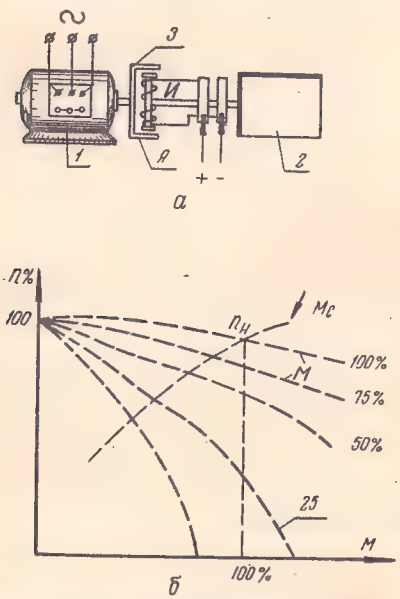


Рис. 136. Электромагнитная муфта скольжения и ее механические характеристики:

1 — двигатель; *2* — механизм; *Я* — якорь муфты; *И* — индуктор муфты; *n* — обороты индуктора; *M* — момент, развиваемый индуктором; $M_с$ — момент механизма.

Асинхронные или электромагнитные муфты скольжения применяются в тех установках, где требуется получить плавное изменение скорости вращения.

Якорь электромагнитной муфты скольжения (рис. 136, *а*) по устройству напоминает ротор короткозамкнутого двигателя и может быть выполнен с короткозамкнутой обмоткой в виде беличьего колеса или в виде массивного стального сердечника. Второй основной частью электромагнитной муфты является индуктор *И*, в пазах которого уложена обмотка, питаемая постоянным током. Муфты

выполняют также и с наружным якорем, внутри которого вращается индуктор с обмоткой. Обе части муфты вращаются. Одна из них соединена с приводным двигателем, а другая — с производственным механизмом.

При вращении ведущей части муфты индуктор наводит в якоре токи, магнитные потоки которых взаимодействуют с магнитным полем индуктора и создают вращающий момент. Таким образом, ведущая часть муфты увлекает ведомую. При этом скольжение зависит от сопротивления якоря, величины магнитного поля индуктора (обеспечивается регулированием величины тока в обмотке индуктора) и величины нагрузочного момента. На рисунке 136, *б* представлены механические характеристики муфты. Каждая механическая характеристика приведена для определенного тока возбуждения индуктора. Цифра 100 означает, что ток индуктора номинальный — 100%. Цифры 75, 50, 25 и т. д. означают, что характеристика относится к случаю, когда величина тока возбуждения в обмотке индуктора соответственно равна 75, 50 и 25% и т. д.

Система с электромагнитной муфтой может обеспечить диапазон изменения скорости вращения в пределах примерно 10 : 1.

Мощности приводов, для которых можно использовать асинхронную электромагнитную муфту, колеблются от нескольких десятков ватт до нескольких тысяч киловатт.

Достоинства электропривода с электромагнитной муфтой — это плавность изменения скорости и удобство управления; недостатки — низкий к. п. д. электропривода в целом, так как он определяется произведением к. п. д. двигателя на к. п. д. самой муфты. Общий к. п. д. такого электропривода равен примерно 50%.

Глава XII

Синхронные машины

§ 1. Устройство синхронных машин. Способы возбуждения синхронных генераторов

К синхронным машинам относятся синхронный генератор и синхронный двигатель. Синхронными они называются потому, что скорость их

вращения не зависит от нагрузки и равна скорости вращения магнитного поля:

$$n = \frac{60f}{p},$$

f — частота;

p — число пар полюсов.

Скольжение s синхронной машины равно нулю.

Принцип действия простейшего синхронного генератора переменного тока был рассмотрен в главе VI (§ 1, рис. 40).

Если к кольцам подвести переменный ток, то виток будет иметь собственное магнитное поле и, взаимодействуя с полем статора, начнет вращаться. Машина будет работать как двигатель.

Принцип действия генератора трехфазного тока был рассмотрен в главе VII (§ 1, рис. 55). Трехфазный синхронный двигатель устроен аналогично. Если обмотка индуктора включена на постоянный ток, а обмотка якоря на сетевое напряжение, то индуктор вращается от взаимодействия магнитных полей статора и ротора.

Статор синхронной машины по своему устройству не отличается от статора асинхронной машины. Ротор может иметь неявно выраженные или явно выраженные полюса. В соответствии с этим машина называется **неявнополюсной** или **явнополюсной**.

Неявнополюсные синхронные машины — быстроходные (1500—3000 *об/мин*). Явнополюсные машины применяются при скорости вращения не больше 1000 *об/мин*. Явнополюсными выполняют роторы тихоходных генераторов, предназначенных для работы, например, с гидротурбинами (гидрогенераторы). Неявнополюсными выполняют роторы быстроходных генераторов для паровых турбин (турбогенераторы).

Для сельских электростанций выпускают генераторы следующих групп:

а) генераторы с независимым возбуждением от машинных возбудителей, б) генераторы с самовозбуждением от твердых или от механических выпрямителей.

Схема генератора с **машинным возбудителем** представлена на рисунке 137. Для питания постоянным током обмотки ротора используют генератор постоянного тока с параллельным возбуждением, который называется **возбудителем**. Мощность возбудителя

составляет всего 0,3—3% от мощности синхронного генератора. Меньшее значение относится к более мощным генераторам. Напряжение возбудителя для генераторов сельских станций не превышает 115 *в*. Напряжение, индуктируемое в обмотке статора, равно 133/230 *в*, 230/400 *в*, 6300 *в*.

Генераторы с машинным возбуждением для сельских станций выполняют горизонтальными и вертикальными. Первые предназначены для работы с паровыми турбинами, дизелями и горизонтальными гидротурбинами. Вертикальные генераторы предназначаются для работы только с вертикальными гидротурбинами.

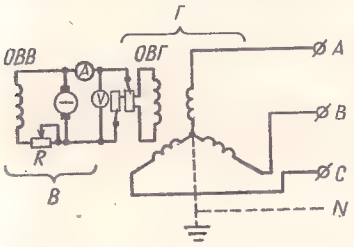


Рис. 137. Схема генератора с машинным возбуждением:
Г — генератор; *В* — возбудитель; *ОВВ* — обмотка возбуждения возбудителя; *ОВГ* — обмотка возбуждения генератора.

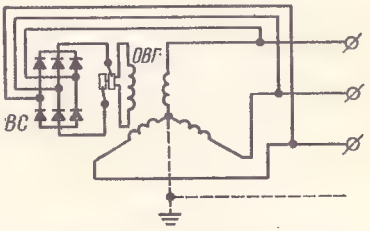


Рис. 138. Схема генератора с самовозбуждением от селеновых выпрямителей:
ОВГ—обмотка возбуждения генератора; *ВС* — селеновые выпрямители.

Находятся в эксплуатации и выпускаются генераторы типа СГ (синхронный генератор) мощностью от 15 до 60 *ква*; генераторы типа С — мощностью от 80 до 195 *ква*; ДГС (к первичному двигателю внутреннего сгорания) от 12 до 62 *ква* на 1500 *об/мин*; СВ (синхронный вертикальный) — от 80 до 150 *ква*; ГС (гидрогенератор синхронный)— от 250 до 3000 *ква* и от 214 до 1000 *об/мин*; ГСГ и ГСД (первый — гидрогенератор, второй — дизельный)— от 125 до 3000 *ква* с оборотами от 150 до 1000 в минуту; ГД и ГЛУ (первый — дизельный, второй — локомобильный) — от 270 до 5000 *ква* и др.

Генераторы с самовозбуждением подразделяются на генераторы с твердыми полупроводниковыми выпрямителями и генераторы с механическим выпрямителем. На рисунке 138 представлена схема генератора с самовозбуждением от селеновых выпрямителей (см. гл. XIII). Прин-

цип действия такого генератора заключается в следующем. При вращении генератора вхолостую под влиянием остаточного магнетизма полюсов ротора в обмотке статора будет индуктироваться небольшая э. д. с. Эта э. д. с. через выпрямители *ВС* приложена к обмотке возбуждения *ОВГ*. В замкнутой цепи обмотки возбуждения протекает ток, который усиливает поток остаточного магнетизма, вследствие чего возрастает э. д. с. в обмотке статора. Ток возбуждения увеличивается еще более и т. д.

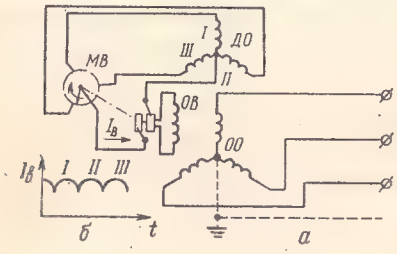


Рис. 139. Генератор с механическим выпрямителем:

а — схема генератора; *б* — характер тока в цепи обмотки возбуждения *ОВ*; *ОО* — основная обмотка; *ДО* — вспомогательная обмотка; *МВ* — механический выпрямитель.

На рисунке 139, *а* представлена упрощенная схема генератора с механическим выпрямителем. На статоре, кроме основной силовой обмотки *ОО*, укладывается вспомогательная обмотка *ДО* с небольшим числом витков, соединенная в звезду или треугольник изолированно от основной. На роторе уложена обмотка возбуждения *ОВ* и механический выпрямитель *МВ*, по устройству напоминающий коллектор. К щеткам через механический выпрямитель подключены концы вспомогательной обмотки якоря, а на кольца выведены концы обмотки индуктора *ОВ*. На рисунке 139,*б* показан характер тока в цепи обмотки возбуждения. Действие механического выпрямителя подобно действию коллектора постоянного тока (принцип его работы изложен в гл. X, § 1).

С самовозбуждением от встроенного механического выпрямителя изготавливаются синхронные генераторы трехфазного тока серии ЕС (единая серия). Они имеют мощности от 20 до 75 *квт* (25—93,7 *ква*), напряжения 400 и 230 *в* на 1000 и 1500 *об/мин*. Каждый генератор комплектуется щитом управления типа ЩУП. Щит управления снабжен устройством для поддержания напряжения на постоянном уровне (стабилизации) при изменении нагрузки. Обозначение типа генератора расшифровывается следующим образом: например, ЕС92—6С — единая серия, девятого габарита, второй длины, шестиполюсный, с самовозбуждением.

§ 2. Основные параметры генераторов

К основным параметрам синхронных генераторов относятся: номинальное напряжение, номинальная сила тока нагрузки, номинальная мощность, номинальная сила тока возбуждения, номинальный коэффициент мощности, номинальная частота.

1. Номинальное напряжение генератора может быть равно 230, 400, 6300 *в*, то есть напряжение на зажимах генераторов на 5% выше стандартных напряжений токоприемников. Напряжение 6300 *в* имеют генераторы большой мощности.

2. Номинальная сила тока нагрузки — это сила тока, на которую рассчитан тепловой режим генератора. Допускаются кратковременные перегрузки в аварийных режимах: на 10% продолжительностью 60 *мин*, на 15% — 15 *мин*, на 20% — 6 *мин*, на 25% — 5 *мин*, на 50% — 2 *мин*, на 100% — 1 *мин*. Более длительная перегрузка опасна для изоляции обмоток из-за перегрева. Это относится и к току возбуждения.

3. Номинальная мощность — это длительно развиваемая мощность при номинальном напряжении, номинальной силе тока и коэффициенте мощности при номинальной нагрузке и температуре охлаждающего воздуха (входящего в генератор) +35°. Длительно допустимая температура нагрева обмоток указана в инструкции по эксплуатации генераторов. Она зависит от класса изоляции обмоток. В большинстве случаев она не должна превышать 100—120° для статорных обмоток и 105—145° для роторных.

4. Номинальный коэффициент мощности обычно равен 0,8. При работе генератора с меньшим коэффициентом мощности активная мощность его снижается, не полно используется мощность первичного двигателя.

5. Номинальная частота в СССР равна 50 *гц*. В деревообделочной промышленности применяют генераторы на 200 *гц* для привода ручного инструмента.

6. Заводы-изготовители прилагают к генераторам характеристики холостого хода и короткого замыкания. Эти характеристики необходимы при проектировании и эксплуатации электростанций, в частности при решении вопросов об устойчивости параллельной работы синхронных генераторов, регулировании напряжения и компаун-

дирования, а также при расчетах токов короткого замыкания для выбора необходимой релейной защиты и т. д.

§ 3. Параллельная работа генераторов

Для включения генераторов на параллельную работу они должны быть синхронизированы. Существуют два принципиально различных способа синхронизации: способ точной синхронизации и способ самосинхронизации.

Метод точной синхронизации состоит в том, что включаемый генератор предварительно приводят во вращение и возбуждают. В момент включения его на параллельную работу с работающим генератором необходимо обеспечить следующие условия синхронизации:

1) порядок следования фаз у включаемого генератора должен совпадать с порядком следования фаз работающего генератора (или сети, в которую включается генератор);

2) напряжения включаемого и работающего генераторов должны быть равны по величине и совпадать по фазе; совпадения напряжений добиваются изменением силы тока в обмотке возбуждения;

3) частота тока включаемого генератора должна быть равна частоте тока работающего; совпадения частот добиваются путем изменения скорости вращения включаемого генератора.

Если все эти условия выполнены, включаемый генератор можно рубильником или выключателем соединить с работающим.

Взаимодействие между вращающимися магнитными полями статорных обмоток параллельно работающих генераторов Φ_{c1} и Φ_{c2} и магнитными полями электромагнитов роторов Φ_{p1} и Φ_{p2} показано на рисунке 140. Векторы Φ_{c1} и Φ_{c2} вращаются синхронно с угловой скоростью ω и совпадают по фазе в каждый момент времени. Векторы Φ_{p1} и Φ_{p2} также вращаются синхронно между собой и с векторами Φ_c. Но углы сдвига фаз магнитного поля статора и ротора ψ_1 и ψ_2 могут меняться в различных пределах в зависимости от нагрузки. Если эти углы равны между собой, это означает, что оба генератора несут одинаковую активную нагрузку (если их номинальная мощность одинакова). Для того, чтобы один из генераторов принял

большую нагрузку, необходимо воздействовать на регулятор оборотов первичного двигателя этого генератора, увеличить на его валу вращающий момент, тогда увеличится угол ψ, это укажет на то, что генератор принял добавочную нагрузку. Так, угол ψ_2 (рис. 140,*б*) больше угла ψ_1 (рис. 140,*а*), так как этот генератор (рис. 140,*б*) несет бо́льшую нагрузку.

Чтобы один из генераторов взял на себя и часть реактивной мощности, необходимо увеличить ток возбуждения генератора. Одновременно с увеличением нагрузки вновь включенного генератора необходимо снижать нагрузку работающих ранее генераторов. В противном случае возрастет частота. Чтобы не повысилось напряжение, при увеличении тока возбуждения вновь включенного генератора, необходимо снизить ток возбуждения у работавших ранее генераторов.

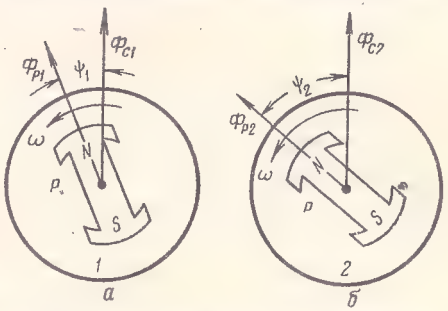


Рис. 140. Взаимодействие магнитных полей статорных обмоток с магнитными полями электромагнитов ротора при параллельной работе генераторов.

Точной синхронизации добиваются при помощи с и н х р о н о с к о п а — специально предназначенного для этого прибора.

На сельскохозяйственных станциях для контроля равенства напряжений используют два вольтметра, один из которых включен в работающий генератор, а другой — в подключаемый. Равенство частот контролируют двумя частотомерами.

По окончании монтажа генератора, предназначенного для параллельной работы, перед пуском его в эксплуатацию проверяют порядок следования фаз (рис. 141). Между зажимами генератора (на рубильнике P_1) и шинами сети, с которой генератор будет работать параллельно, включают по две последовательно соединенные электрические лампы. Каждая лампа рассчитана на фазное напряжение сети. Затем приводят в действие генератор и включают рубильник P_2 (при отключенном P_1). Если векторы на-

пряжений сети и генератора не совпадают по фазе, а также имеется разница в частотах сети и генератора, но чередование фаз оказалось одинаковым, то все три пары ламп будут гаснуть и загораться одновременно. Если же чередование фаз в генераторе не совпадает с чередованием фаз сети, то загорание и погасание ламп в различных фазах не совпадает по времени.

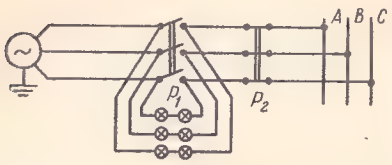


Рис. 141. Проверка чередования фаз у генератора.

В этом случае меняют местами два отходящих от генератора линейных провода (остановив предварительно генератор) и вновь проверяют совпадение фаз. Затем маркируют зажимы генератора в соответствии с обозначениями фаз в сети, а лампы снимают.

На электростанции, где включают генераторы на параллельную работу, приборы, предназначенные для синхронизации, устанавливают на специальных синхронизационных колонках.

Имеется ряд схем точной синхронизации. В зависимости от принятой схемы для щитка, где устанавливают приборы для синхронизации (синхронизационной колонки), подбирают тот или иной комплект приборов. Ниже рассмотрены схемы точной синхронизации.

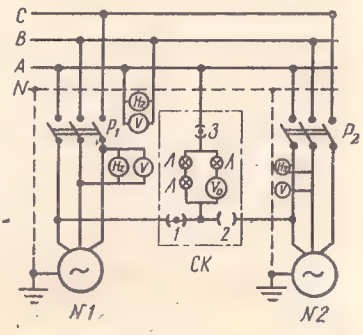


Рис. 142. Схема точной синхронизации генераторов.

Схема 1. Колонка синхронизации *СК* (рис. 142) состоит из двух параллельных цепей: в одной последовательно включены две лампы *Л*, а в другой последовательно включены вольтметр V_0 с отчетливой шкалой у нуля и лампа *Л*. От каждого из генераторов к синхронизационной колонке отходит по одному проводу от одноименных фаз. Цепи синхронизации замыкаются по нулевому проводу на фазные обмотки генератора. Между проводами от фаз

генераторов и синхронизационным устройством смонтированы штепсельные розетки *1*, *2*, *3*. Предположим, что синхронизируется с сетью генератор № 1. Его пускают в ход и, меняя скорость вращения первичного двигателя и величину тока возбуждения генератора, устанавливают по частотомеру Hz и вольтметру V частоту и напряжение, равные сетевым. После этого двумя штепселями замыкают контакты *1* и *3*. Продолжая менять скорость вращения включаемого генератора в небольших пределах и ток возбуждения, добиваются синхронизма. Его наступление фиксируется потуханием ламп $Л$ и нулевым показанием вольтметра V_0. При приближении стрелки к нулю включают рубильник P_1. Генератор синхронизирован. Колонку синхронизации сразу же отключают (выключают штепсели *1* и *3*). Оставлять штепсели в гнездах недопустимо, ибо при отключенных генераторах на их зажимах окажется напряжение сети, что представит опасность для обслуживающего персонала.

В рассмотренной схеме можно обойтись и без нулевого вольтметра. Однако в этом случае точность метода значительно снижается, так как лампы дают видимый накал лишь при напряжении 25—30% номинального и по ним трудно уловить момент действительного совпадения векторов напряжения. Лампы, включенные параллельно цепи с вольтметром, контролируют исправность этой цепи. Последовательно их включают из-за того, что в некоторые моменты цепь может оказаться под двойным фазным напряжением.

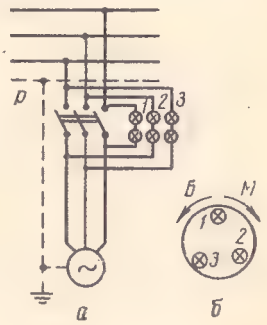


Рис. 143. Схема включения лампового синхроноскопа (*а*) и размещение ламп 1, 2, 3 по кругу для получения эффекта «бегающего огня» (*б*).

Если по данной схеме синхронизируются высоковольтные генераторы, то синхронизационную колонку включают через трансформаторы напряжения.

Схема 2. На рисунке 143, *а* приведена схема включения лампового синхроноскопа. Лампы *1* присоединены к одной фазе, а лампы *2* и *3* подключены к разным фазам. При синхронизме лампы *1* будут погашены, а лампы *2* и *3*

будут гореть полным накалом. При разной частоте, то есть разной скорости вращения генераторов, лампы *1*, *2*, *3*, расположенные по кругу (рис. 143,*б*), будут загораться и погасать неодновременно, создавая впечатление «бегающего огня». По направлению вращения «бегающего огня» можно судить о том, следует ли увеличить (*Б*) обороты или уменьшить (*М*) их у включаемого в синхронизм генератора. Генератор включают на параллельную работу в момент, когда вращение светового пятна прекратилось.

Схемы самосинхронизации. Рассмотренные выше способы точной синхронизации сравнительно сложны, и для автоматизации процессов точной синхронизации требуется сложная и дорогая аппаратура. Поэтому в практике в настоящее время широко применяется способ самосинхронизации, который заключается в следующем.

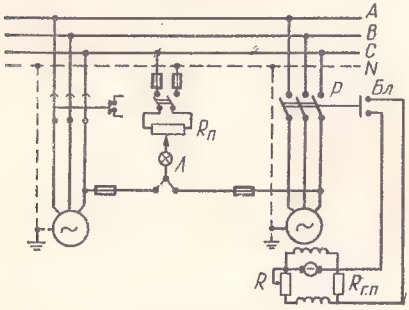


Рис. 144. Схема самосинхронизации генераторов:

Бл — блокировочные контакты; $R_{г.п}$ — сопротивление гашения поля; $R_п$ — реостат, включенный как потенциометр; R — реостат в цепи возбуждения возбудителя.

Невозбужденный генератор, у которого магнитное поле погашено специально включенным в цепь возбуждения возбудителя сопротивлением гашения поля $R_{г.п}$ (рис. 144), разворачивают первичным двигателем до оборотов, близких к номинальным. При скольжении примерно 2—3% генератор включают в сеть рубильником *Р*. Одновременно подают возбуждение, шунтируя сопротивление гашения поля блок-контактами *Бл*. Генератор после этого постепенно плавно втягивается в синхронизм.

В момент включения генератора в сеть на параллельную работу возникают кратковременные толчки тока, которые являются следствием подключения к сети невозбужденного генератора. Эти толчки не нарушают нормальной работы ранее работавших генераторов и потребителей.

В настоящее время этот способ самосинхронизации считается основным и обязательным для всех многоагрегатных сельских электростанций.

Метод точной синхронизации применяется лишь в тех случаях, когда из-за большой загруженности ранее работавших генераторов метод самосинхронизации нельзя применить.

Самосинхронизация может быть автоматизирована. Ручная самосинхронизация применяется только тогда, когда генераторы оснащены рубильниками (на маломощных станциях) или выключателями без дистанционного управления (высоковольтные генераторы). Для того чтобы судить о разности частот, используют лампочку *Л* на небольшое напряжение — от 6 до 36 *в*, включаемую, как показано на рисунке 144. Выбор лампочки зависит от остаточного напряжения генератора. Лампочка будет иметь заметный накал при разности частот не менее 2 *гц*. Однако наиболее совершенный способ измерения разности частот — это включение специальных реле типа ИРЧ (индукционных реле разности частот).

Порядок операций следующий. Генератор разгоняют первичным двигателем при выключенном рубильнике *Р* и разомкнутых блок-контактах *Бл*. В цепи обмотки возбуждения возбудителя включено сопротивление $R_{г.п}$ гашения поля. Когда пускаемый генератор достигает скорости, близкой к синхронной, лампочка *Л* гаснет. При этом рубильник *Р* включается, замыкаются блок-контакты *Бл* и шунтируется сопротивление гашения поля $R_{г.п}$. Восстанавливается нормальное возбуждение, генератор втягивается в синхронизм.

При полуавтоматической самосинхронизации агрегаты запускают ручным воздействием на управление первичного двигателя, а включение генератора в сеть и подача возбуждения происходят автоматически.

При автоматической самосинхронизации пуск агрегата, включение генератора в сеть и подача возбуждения происходят автоматически.

Необходимо помнить, что шунтовой реостат *R* в цепи возбуждения возбудителя должен быть установлен так, чтобы при расшунтировании обмотки возбуждения был обеспечен подъем напряжения на клеммах генератора при холостом ходе до номинального значения, равного рабочему напряжению на шинах электростанции.

§ 4. Генераторы переменного тока с постоянными магнитами. Магнето

Генераторы переменного тока с постоянными магнитами (Г-30А2, Г-31А, Г-32А2) широко применяются на тракторах, где основным потребителем являются источники света. Эти генераторы дешевле генераторов постоянного тока, применяемых на автомобилях, и проще их по конструкции. Недостатки их заключаются в том, что они обладают сравнительно малой мощностью, узким диапазоном оборотов, при которых поддерживается необходимое напряжение (6—7,5 *в*), и от них невозможно подзаряжать аккумуляторы.

На статоре генератора уложена обмотка якоря. Ротор выполнен из магнитного железо-никель-алюминиевого сплава в виде шестиполюсного магнита с чередованием полюсов *N—S—N—S—N—S*. Обмотка статора соединена в звезду. На щитке генератора имеется четыре зажима. К одному из них выведен общий нуль обмоток, а к трем другим — концы обмоток.

На тракторах с карбюраторными двигателями при отсутствии аккумуляторов применяется система зажигания от магнето. Магнето представляет собой генератор-трансформатор переменного тока. Его устройство представлено на рисунке 145. Магнитная система магнето состоит из двух стальных стоек *1* с сердечником *2*, катушки *4* низкого напряжения и катушки *3* высокого напряжения. Стойки *1* имеют полюсные башмаки *5*, между которыми вращается ротор *6*, представляющий собой сильный магнит. Один конец обмотки низкого напряжения или первичной обмотки выведен на массу *M*, а второй — на подвижный контакт *K* прерывателя *7*. Вторичная обмотка служит для получения высокого напряжения и распределения его по свечам зажигания двигателя. Один конец этой обмотки соединен с обмоткой низкого напряжения, а второй — с контактами распределителя *8* при помощи скользящего угольного контакта *9*.

При вращении ротора магнето от двигателя трактора в обмотке низкого напряжения индуктируется э. д. с. переменного тока 12—15 *в*. Э. д. с. индуктируется и в обмотке высокого напряжения. При замкнутых контактах прерывателя в обмотке низкого напряжения протекает ток, который усиливает магнитное поле *Ф* сердечника.

Когда это поле достигает максимальной величины, контакт *К* прерывателя размыкается, исчезает ток и вместе с ним — магнитный поток. При этом в обмотке высокого напряжения индуктируется э. д. с. высокого напряжения, которая складывается с наведенной э. д. с. от потока магнита ротора. При помощи распределителя это высокое напряжение поочередно подводится к искровым промежуткам *ИП* запальных свечей, где под его действием про-

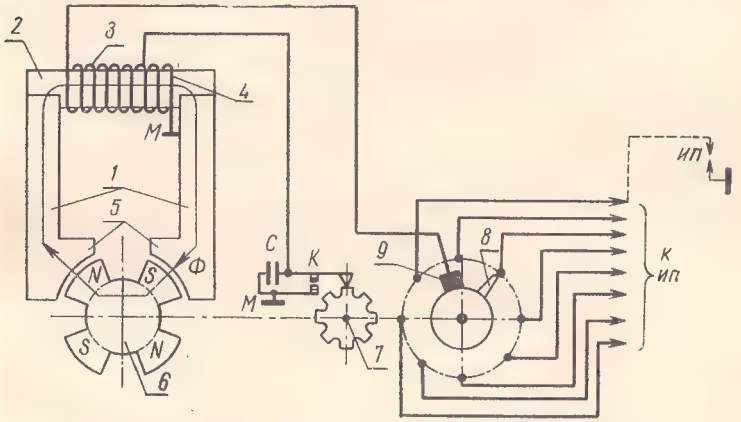


Рис. 145. Схема магнето высокого напряжения.

1 — стальные стойки; *2* — сердечник; *3* — катушка высокого напряжения; *4* — катушка низкого напряжения; *5* — полюсные башмаки; *6* — ротор с постоянными магнитами; *7* — прерыватель; *8* — распределитель в цепи высокого напряжения; *9* — угольный коптакт; *С* — искрогасительный конденсатор; *М* — масса (корпус); *ИП* — искровые промежутки запальных свечей двигателя внутреннего сгорания.

скакивает искра, которая воспламеняет рабочую смесь в очередном цилиндре двигателя. Параллельно контактам прерывателя включен конденсатор *С*, назначение которого — погасить э. д. с. самоиндукции в первичной обмотке при размыкании контактов прерывателя. Его иногда называют искрогасительным конденсатором.

§ 5. Синхронные двигатели

По своему устройству синхронные двигатели ничем не отличаются от синхронных генераторов. Для улучшения условий пуска воздушный зазор между ротором и статором у двигателя выполняется меньшим, чем у генератора.

Одно из ценных качеств синхронного двигателя — его способность работать с различными коэффициентами мощности. Изменяя ток возбуждения, можно получить изменение косинуса фи в широких пределах, независимо от нагрузки. Недовозбужденный двигатель работает с отстающим cos φ, так как из сети потребляется намагничивающий ток. При увеличении тока возбуждения (перевозбуждении) cos φ будет опережающим (емкостным), так как в сеть в данном случае будет отдаваться намагничивающий ток.

Свойство перевозбужденных синхронных двигателей широко используется при компенсации cos φ в сети. В таких случаях перевозбужденный синхронный двигатель называют синхронным к о м п е н с а т о р о м реактивной мощности. Посылая реактивную (при опережающем cos φ) мощность в сеть, компенсатор снижает реактивную индуктивную мощность, потребляемую двигателями из сети от основного источника тока. Линия к источникам электроснабжения разгружается от реактивных токов. Разгружаются также трансформаторы и генераторы. Мощность компенсаторов составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч *квар* (см. главу VI).

Синхронные двигатели мощностью от долей ватта до нескольких сотен ватт выполняют без скользящих контактов. Их применяют там, где требуется строго заданная скорость вращения: в магнитофонах и проигрывателях, в звуковых киноаппаратах, электрических часах, самопишущих приборах и т. п. По принципу действия их делят на р е а к т и в н ы е и г и с т е р е з и с н ы е.

У реактивных бесконтактных синхронных электродвигателей ротор явнополюсный без обмотки возбуждения и без постоянных магнитов. Магнитное поле в роторе наводится магнитным полем обмотки статора. Последняя уложена в пазах железа статора и равномерно распределена по окружности или же выполнена в виде одной или нескольких катушек возбуждения, уложенных на явно выраженных полюсах стали статора.

Гистерезисные электродвигатели имеют цилиндрический (из магнито-твердого материала) или дисковый (из закаленной стали) ротор без обмотки. Вращающий момент создается благодаря явлению гистерезиса (остаточной магнитной индукции). Причем в асинхронном режиме (например, при разгоне) материал ротора перемагничивается, а в синхронном режиме имеется постоянное остаточ-

ное магнитное поле, которое взаимодействует с вращающимся магнитным полем статора.

При мощностях до нескольких десятков ватт эти двигатели выполняют однофазными с одной обмоткой на статоре (с двумя концами). Двигатели просты по конструкции, удобны и надежны в эксплуатации и незаменимы там, где требуется синхронная скорость вращения при небольшом вращающем моменте. В сельском хозяйстве их ждет большое будущее.

Глава XIII

Выпрямление переменного тока в постоянный

§ 1. Вращающиеся преобразователи тока

На современных электростанциях генерируется и передается потребителям электрическая энергия переменного трехфазного тока. Но в ряде отраслей промышленности (электрохимическая, металлообрабатывающая, цветная металлургия и др.), а также на электрифицированном транспорте требуется электрическая энергия постоянного тока.

Наиболее простой способ получения электрической энергии постоянного тока — преобразование переменного тока. Для этой цели используются специальные устройства — преобразователи тока. По принципу действия они разделяются на вращающиеся преобразователи и статические выпрямители.

К вращающимся преобразователям относятся двигатель-генератор и одноякорный преобразователь.

Двигатель-генератор состоит из двигателя переменного тока, на одном валу с которым работает генератор постоянного тока. В преобразователях небольшой мощности (зарядные агрегаты, сварочные агрегаты) в качестве первичного двигателя используется асинхронный короткозамкнутый электродвигатель. В преобразователях большой мощности — синхронный двигатель. Такой преобразователь надежен в работе и прост в обслуживании. Существенным недостатком его является низкий к. п. д., равный произведению к. п. д. обеих машин.

Одноякорный преобразователь представляет собой генератор постоянного тока, на валу которого обычно с обратной стороны от коллектора насажены контактные кольца. Их может быть два или три — в зависимости от числа фаз преобразуемого переменного тока. Принцип действия одноякорного преобразователя (рис. 146) основан на свойстве замкнутой якорной обмотки при ее вращении в неподвижном магнитном поле давать одновременно постоянное напряжение на коллекторе *Кл* и переменное на кольцах *Кц* (см. гл. VI, § 1).

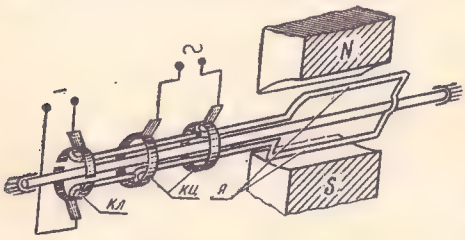


Рис. 146. Одноякорный преобразователь переменного тока в постоянный:
Кц — кольца; *Кл* — коллектор; *Я* — якорь.

Если вращать обмотку такой машины при помощи постороннего двигателя, то с коллектора можно снимать постоянный ток, а с колец — переменный. Если к коллектору *Кл* подвести постоянный ток, то якорь *Я* будет вращаться, а с колец при этом можно снимать переменный ток. И, наконец, если к кольцам подвести переменный ток, то машина будет работать как синхронный двигатель, а с коллектора можно снимать постоянный ток. Выпрямление здесь — механическое. Последний режим — нормальный для одноякорного преобразователя. Напряжение выпрямленного тока регулируется изменением напряжения переменного тока, подводимого к кольцам. Несмотря на простоту и компактность устройства, одноякорный преобразователь имеет ряд эксплуатационных недостатков, а именно наличие коллектора и щеток, сравнительную сложность пуска мощных машин, узкий предел регулирования выпрямленного напряжения и т. д. Поэтому в настоящее время они вытеснены ртутными выпрямителями.

В ряде случаев одноякорные преобразователи используются как **инверторы** — преобразователи постоянного тока в переменный. Преобразователи постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток высокого напряжения, имеющие два коллектора на своем валу, называются **умформерами**.

§ 2. Твердые выпрямители

К твердым выпрямителям относятся селеновые, купроксные (меднозакисные), германиевые, кремниевые и другие полупроводниковые выпрямители. В основе действия этих выпрямителей лежит свойство односторонней электропроводности и непропорциональной зависимости тока от приложенного напряжения. Элементы выпрямителей, которые пропускают ток в одном направлении, называются вентилями.

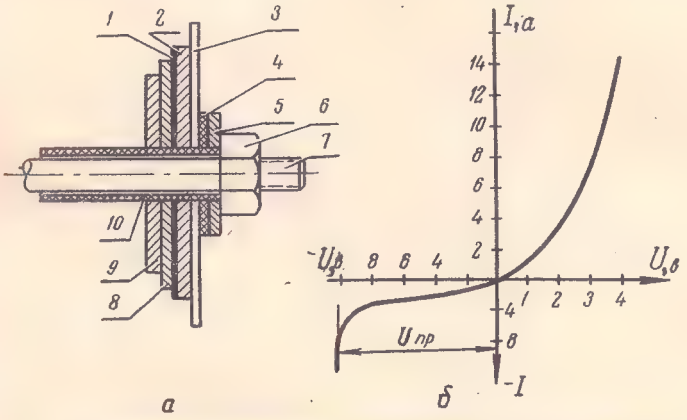


Рис. 147. Шайба купроксного выпрямителя (*а*) и его вольт-амперная характеристика (*б*):

1 — слой закиси меди; *2* — медный диск; *3* — теплоотводящая пластинка; *4* — изолирующая шайба; *5* — шайба под гайку; *6* — гайка; *7* — болт; *8* — свинцовый диск; *9* — теплоотводящая шайба; *10* — изолирующая трубка; $U_{пр}$ — пробивное напряжение.

Первые твердые выпрямители — купроксные и селеновые — появились еще в 20-х годах. Первоначально наибольшим распространением пользовался купроксный выпрямитель (рис. 147,*а*). В качестве полупроводника в нем используется слой закиси меди (Cu_2O). Этот слой получается путем специальной термической обработки поверхности медной пластинки. В результате такой обработки внутренняя часть полупроводникового слоя, обращенная к медной пластинке, содержит некоторый избыток атомов меди, а внешняя — избыток атомов кислорода. Вся толщина слоя не более 0,1 *мм*. К полупроводниковому слою

прикладывается свинцовая пластинка, которая обеспечивает хороший контакт с поверхностью полупроводника.

Полупроводниковый слой между медью и свинцом хорошо проводит ток (имеет малое сопротивление) от свинца к меди и плохо проводит от меди к свинцу. Направление тока от свинца к меди называется прямым направлением, а от меди к свинцу — обратным. Способность выпрямлять переменный ток в постоянный характеризуется при этом коэффициентом выпрямления, который представляет собой отношение сопротивления в обратном направлении к сопротивлению в прямом направлении. Этот коэффициент может быть определен по вольт-амперной характеристике выпрямителя (рис. 147, *б*).

Напряжение, при котором выпрямитель перестает проводить в одном направлении и начинает проводить одинаково в обе стороны, называется пробивным. Это напряжение выводит из строя выпрямитель. Его первоначальное свойство выпрямления уже не восстанавливается. Напряжение, при котором выпрямитель предохранен от пробоя и длительно нормально работает, называется обратным напряжением.

Элемент купроксного выпрямителя допускает обратное напряжение до 8—10 *в* при окружающей температуре 35°. При бóльших напряжениях элемент может быть пробит. Плотность тока на 1 $см^2$ составляет 10—15 *ма*. Срок службы— 12—15 лет, к. п. д.— 20—30%. Из отдельных элементов выпрямителя собирают выпрямительные столбики (купроксные столбики). Столбик, состоящий из 16—13 элементов, может быть включен для выпрямления напряжения, равного 127 *в* (один элемент на каждые 8—10 *в*). Если площадь активного полупроводникового слоя равна 2 $см^2$, то величина выпрямленного тока не должна превышать $2 \cdot 15 = 30$ *ма*. Если же цепь, в которой включен выпрямительный столбик, будет иметь малое сопротивление и ток превысит указанную величину, то столбик быстро нагреется и выйдет из строя.

Основной недостаток купроксных выпрямителей —их высокая стоимость из-за дефицитности красной меди, которая используется в этих выпрямителях. Поэтому их применяют для выпрямления малых переменных токов, например в электроизмерительных приборах. Для выпрямления больших токов используют селеновые выпрямители.

Устройство селенового вентиля (элемента выпрямителя) представлено на рисунке 148. Полупроводниковый слой состоит из селена. Односторонняя проводимость достигается созданием тонкого слоя селенистого кадмия между селеном и контактной пластиной. Слой селена не более 0,1 *мм*. Его наносят на диск из алюминия или никелированной стали. С обратной стороны на селен наносят слой из сплава кадмия, висмута и олова толщиной 0,05 *мм*. К этому слою прижимают контактную латунную шайбу. Из элементов составляют выпрямительные столбики. Между отдельными элементами устанавливают охлаждающие радиаторные пластины. Направление тока в данном случае — от селена к кадмиевому селену.

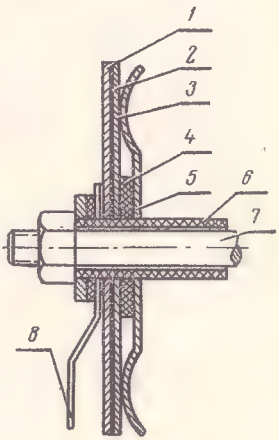


Рис. 148. Шайба селенового выпрямителя:
1 — алюминиевый диск; *2*—слой селена; *3*—сплав кадмия, олова и висмута; *4* — теплоотводящая шайба; *5* — токоотводящая шайба; *6* — изолирующая трубка; *7* — болт; *8* — токоотвод.

Обратное напряжение на элемент селенового выпрямителя равно 16—20 *в*. Плотность тока при естественном охлаждении — 30—40 *ма/см*^{2}. При принудительном воздушном охлаждении плотность тока может быть повышена в 3—4 раза. Срок службы — до 100 000 *ч*, к. п. д. — до 85%. Селеновые выпрямители широко применяются в различных силовых установках. Выпускается целый ряд выпрямителей для зарядки аккумуляторов типа ВСА, включаемых в сеть переменного тока 110, 127, 220 *в* и дающих на выходе напряжение постоянного тока, равное в зависимости от номера выпрямителя 6, 12, 24, 32, 60, 120 *в* и т. д., а также другие типы выпрямителей.

В последние годы широко внедряются германиевые и кремниевые диоды (вентили). Миниатюрные германиевые диоды типа ДГЦ, Д7, Д10 и т. д. (рис. 149), широко применяемые в настоящее время во многих отраслях техники, допускают напряжение до 400 *в* и более, а величину выпрямленного тока — до 300 *ма* и более.

В настоящее время разработаны германиевые диоды, работающие с коэффициентом полезного действия до 99%. Некоторые типы диодов при прямом напряжении в 1 *в* допускают ток до нескольких сотен ампер. Благодаря малой потере энергии (высокий к. п. д.) такие диоды, работающие в режиме выпрямителей, не перегреваются при больших нагрузках и не нуждаются в охлаждающих радиаторах. Они по размерам в сотни раз меньше селеновых столбиков, рассчитанных на ту же мощность.

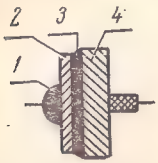


Рис. 149. Устройство германиевого диода: *1*—индий; *2*—германий; *3* — олово; *4* — кристаллодержатель.

Кремниевые вентили ВК имеют коэффициент полезного действия до 98%, рабочее напряжение более 1000 *в* и плотность тока 300 *а/см*^{2}. Выпрямители с такими вентилями в настоящее время вытесняют громоздкие и ненадежные ртутные выпрямители на железнодорожном электрифицированном транспорте. Их использование позволяет широко внедрять электрифицированный транспорт с контактной сетью переменного тока (27,5 *кв*). На электровозе устанавливают трансформатор, кремниевый выпрямитель и сериесный тяговый двигатель постоянного тока.

В зарядных устройствах, в устройствах для преобразования постоянного тока в переменный (инверторах) широко применяются управляемые кремниевые вентили типов ВКУ, УПВК и др.

§ 3. Схемы соединений твердых выпрямителей

Твердые выпрямители можно соединять в различные схемы, предназначенные для выпрямления однофазного и трехфазного тока в постоянный. На рисунке 150, *а* представлена схема однополупериодного выпрямителя однофазного тока. Напряжение переменного тока, которое необходимо для выпрямления, получают при помощи трансформатора. Нагрузку включают в цепь вторичной обмотки трансформатора последовательно с выпрямителем *вп*, который пропускает ток в направлении стрелки, то есть он пропускает ток от положительной полуволны переменного тока, когда верхние витки имеют положительный потенциал по отношению к нижним. Обратная полуволна напряжения не вызывает тока через нагрузку, так как

обратное сопротивление выпрямителя очень большое. Как видно, в цепи нагрузки течет пульсирующий ток. Частота пульсаций — 50 в секунду. Это недостаток однополупериодной схемы.

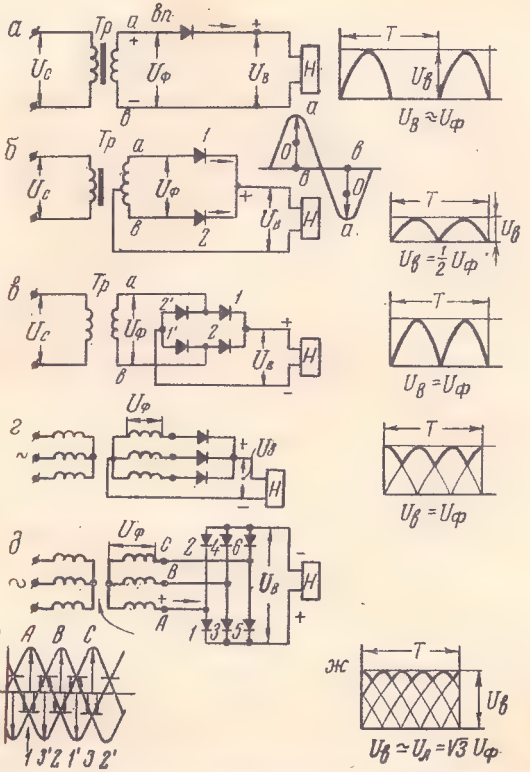


Рис. 150. Схемы соединений твердых выпрямителей:
а — однополупериодное выпрямление; *б* — двухполупериодное; *в* — мостовая схема выпрямителя; *г* — трехфазный однополупериодный выпрямитель; *д* — мостовая схема трехфазного выпрямления; *е* — к схеме *д*; *ж* — характер выпрямленного тока в схеме *б*; *вп* — выпрямитель; $U_в$ — выпрямленное напряжение; *Н* — нагрузка; $T = 1/50$ *сек*; *Тр* — трансформатор.

На рисунке 150, *б* представлена двухполупериодная схема выпрямителя однофазного тока. От средней точки *О* вторичной обмотки выведен один полюс цепи с выпрямленным током, а вторым полюсом попеременно являются

концы от крайних витков *а* и *в* обмотки. По существу эта схема содержит два однополупериодных выпрямителя, которые работают попеременно, в зависимости от направления и знака полуволны напряжения.

При положительной полуволне напряжения верхние витки имеют положительный потенциал по отношению к средним виткам (средняя точка), а средние витки — положительный потенциал по отношению к нижним виткам. Вектор напряжения делится пополам, и выпрямляется его верхняя половина от точки *о* до точки *а*. Ток проходит по цепи: точка *о* — верхние витки — выпрямитель *1* — нагрузка — точка *о*. При отрицательном полупериоде точка *о* имеет отрицательный потенциал по отношению к точке *в*. Но в то же время точка *о* имеет положительный потенциал по отношению к точке *а*. Выпрямленный ток проходит по цепи: точка *о* — выпрямитель *2*— нагрузка— точка *о*. Таким образом, выпрямление происходит в каждый полупериод, но выпрямляется лишь половина напряжения, получаемого во вторичной обмотке трансформатора. В этом заключается основной недостаток схемы. Этот недостаток устранен в следующей схеме, представленной на рисунке 150, *в*. Четыре выпрямителя включены по мостовой схеме. В момент положительной полуволны, когда верхние витки имеют положительный потенциал по отношению к нижним, ток проходит по цепи: точка *а* — выпрямитель *1*— нагрузка — выпрямитель *1'*— точка *в*. При отрицательной полуволне, когда нижние витки имеют положительный потенциал по отношению к верхним, ток проходит по цепи: точка *в* — выпрямитель *2* — нагрузка— выпрямитель *2'*— точка *а*. Мостовые схемы более экономичны, чем предыдущие, и широко применяются в технике.

На рисунке 150, *г* представлена схема выпрямления трехфазного тока. В каждой фазе работает однополупериодный выпрямитель. Но так как векторы напряжения фаз сдвинуты на 120° по отношению друг к другу, то полуволны выпрямленного тока перекрывают друг друга, и пульсация уменьшается.

На рисунке 150, *д* представлена мостовая схема трехфазного выпрямителя (схема Ларионова).

В каждой фазе выпрямляются обе полуволны, так как здесь двухполупериодное выпрямление. К мостику из выпрямителей подводится линейное напряжение. В тече-

ние каждой шестой периода в цепи выпрямленного тока проходит ток под действием выпрямленного напряжения одной из фаз. Рассмотрим процесс выпрямления в этом выпрямителе. В момент времени *1* мгновенное напряжение фазы *A* — максимальное. Положительный потенциал имеют правые витки обмотки. Ток в цепи нагрузки идет по цепи: фаза *A* — выпрямитель *1* — нагрузка — выпрямители *4* и *6* — фазы *B* и *C* — нулевая точка обмотки — фаза *A*. В момент *1′* (рис. 150, *е*), когда на фазе *A* максимум обратной полуволны, ток идет по цепи: фаза *A* — нулевая точка *о* — фазы *B* и *C* — выпрямители *3* и *5* — нагрузка — выпрямитель *2* — фаза *A*. Таким образом, оба полупериода в фазе *A* дали выпрямленный ток. В моменты *2* и *2′* аналогичное выпрямление произойдет в фазе *B*, а в моменты *3* и *3′* — в фазе *C*. Общая картина выпрямленного тока представлена на рисунке 150, *ж*.

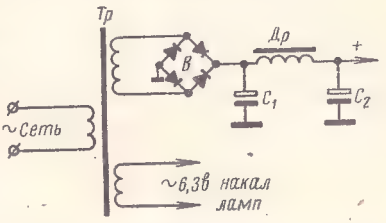


Рис. 151. Выпрямитель по мостовой схеме с сглаживающим фильтром:

Тр — трансформатор; *В* — вентильный мост; *Д* — дроссель фильтра; C_1 и C_2 — конденсаторы сглаживающего фильтра.

Схема Ларионова в настоящее время получила преимущественное распространение для выпрямления трехфазного тока.

В радиотехнических устройствах и электротехнике для выпрямления переменного тока в постоянный до нескольких сотен вольт широко используют вентили. Так, в сетевых радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах используют главным образом выпрямители на диодах по мостовой схеме (рис. 150, *в*). Для сглаживания пульсаций переменного тока на выходе выпрямителя включают сглаживающий фильтр (рис. 151), состоящий из дросселя *Др* и конденсаторов C_1 и C_2.

§ 4. Газотронные и ртутные выпрямители

Для получения выпрямленного тока высокого напряжения в настоящее время широко используют газотронные и ртутные выпрямители.

Газотроны представляют собой выпрямительные вакуумные двухэлектродные лампы, в которые введено

некоторое количество ртути. При работе (накале) лампы ртуть испаряется, и ее пары, ионизируясь под действием вылетающих с катода электронов, создают мощный электронный поток, позволяющий получить значительно большие выпрямленные токи, чем в обычном кенотронном выпрямителе. Газотроны выполняют для выпрямителей на различное напряжение, вплоть до нескольких десятков тысяч вольт.

Ртутные выпрямители в настоящее время наиболее важны в промышленном отношении, так как они обе-

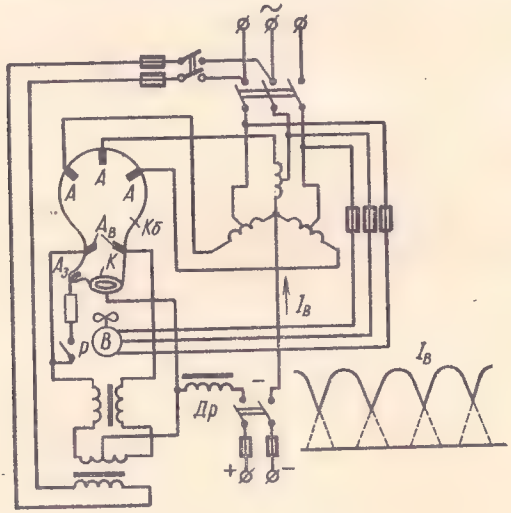


Рис. 152. Устройство и схема включения ртутного выпрямителя:

Кб — колба; *К* — ртутный катод; *А* — аноды; *Ав* — вспомогательные аноды; *Аз* — зажигающий анод; *В* — вентилятор; *Др* — дроссель.

спечивают выпрямление переменного тока в постоянный для мощных силовых установок. Так, стеклянные ртутные выпрямители изготавливаются на токи до 500 *а* при напряжении до 600 *в* и на токи до 20 *а* при напряжении до 15 000 *в*. Металлические ртутные выпрямители (со стальным вакуумным корпусом), применяемые на электрифицированном транспорте, а также при передаче электрической энергии постоянным током, изготавливаются на силу

тока до 5000 *а* при напряжении до 800 *в* и на силу тока до 200 *а* при напряжении до 50 000 *в*.

На рисунке 152 показана схема включения стеклянного трехфазного ртутного выпрямителя. В нижнюю часть стеклянной колбы *Кб*, из которой выкачан воздух, налита ртуть, которая является катодом *К*. Аноды *А* выполняются стальными или графитовыми. Ток в выпрямителе проходит через электрическую дугу, горящую между катодом и тем из анодов, на котором в данный момент потенциал положительный. Электрическая дуга в выпрямителе представляет собой поток электронов от катода к аноду и поток положительных ионов ртути от анодов к катоду.

Для зажигания и поддержания электрической дуги в выпрямителе служит зажигающий анод *Аз* и вспомогательные аноды *Ав*. В момент зажигания дуги в выпрямителе замыкается рубильник *Р* в цепи зажигания, колба наклоняется, и ртуть образует цепь с анодом *Аз*. При наклоне колбы в обратную сторону между зажигающим анодом и ртутью катода проскакивает искра, которая вызывает испарение ртути. Под действием напряжения, приложенного на вспомогательные аноды, разгорается дуга. При этом на поверхности катода (ртути) образуется светящееся катодное пятно, представляющее собой место интенсивного испарения ртути и вылета электронов. Температура пятна достигает 2000—3000°. Атомы газообразной ртути ионизируются, положительные ионы при этом направляются к катоду и, бомбардируя его, поддерживают катодное пятно. Поддерживающий горение дуги ток через вспомогательные аноды (аноды возбуждения) должен быть не менее 3—5 *а*. Вентилятор *В* служит для охлаждения колбы выпрямителя.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ПРОИЗВОДСТВО И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Глава XIV

Источники энергоснабжения и графики их нагрузки

§ 1. Передача электрической энергии от источников к потребителям

Электрическая энергия вырабатывается на электрических станциях, располагаемых, как правило, у источников первичной энергии. Электростанции связаны между собой и с потребителями электрическими сетями, которые объединяют их в энергетические системы (энергосистемы). При этом объединяются тепловые (ТЭС) и гидравлические (ГЭС) электростанции, управление ими централизуется. Нагрузку на электростанции распределяют так, чтобы получить наиболее дешевую электроэнергию. Например, если запас воды на гидравлической станции большой, то ее нагружают на полную мощность, а тепловую разгружают, экономя топливо. Или же за счет ТЭС удовлетворяют постоянную (базисную) нагрузку в течение суток, а ГЭС включают в часы, когда нагрузка возрастает. В настоящее время создана единая энергетическая система европейской части СССР, в которой совместно работают электрические станции общей мощностью более 50 млн. *квт*. Созданы объединенные энергетические системы Северо-Запада, Юга, Закавказья, Северного Кавказа, Сибири и Средней Азии. Это стало возможным благодаря применению линий электропередач напряжением 330 и 500 *кв*. К 1966 г. протяженность линий 500 *кв* составила 8600 *км*. Построена линия электропередачи напряжением 750 *кв* (Канаковская ГРЭС — Москва).

Благодаря энергосистемам не только повышается экономичность электроснабжения, но и значительно увеличивается его надежность, возрастает общая полезная выработка электроэнергии и т. д.

Электрическая система является частью энергосистемы. Электрическая система объединяет генераторы, распределительные устройства, трансформаторные подстанции, электрические линии и токоприемники электрической энергии.

Электрической сетью называют часть электрической системы, которая объединяет трансформаторные подстанции и линии различных напряжений.

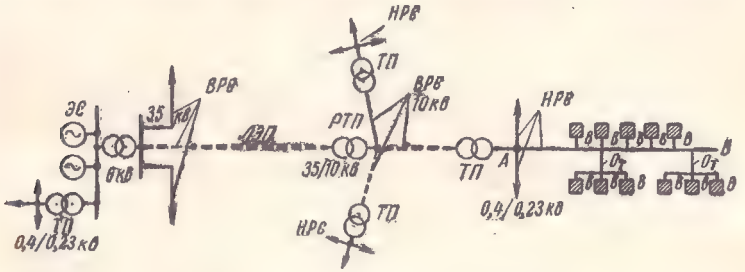


Рис. 153. Схема передачи электрической энергии от источника до потребителя:

ЭС — электростанция; *ТП* — потребительская трансформаторная подстанция 10/0,4 *кв*; *РТП* — районная трансформаторная подстанция 35/10 *кв*; *ВРС* и *НРС* — высоковольтные и потребительские сети; *ЛЭП* — линия электропередачи; *От* — отвод; *В* — ввод.

Электрические сети по назначению делят на распределительные и питательные. Питательной называют электрическую сеть, по которой электроэнергию подводят к распределительным пунктам или районным трансформаторным подстанциям (рис. 153). Эта сеть состоит из линий электропередачи, которые не имеют подключенных потребителей.

Высоковольтная распределительная сеть (*ВРС*) служит для передачи электрической энергии от источника (электростанции *ЭС*, районной трансформаторной подстанции *РТП*) к потребительским трансформаторным подстанциям *ТП*. Чаще для ВРС используют напряжение 6 или 10 *кв*, реже при больших расстояниях 20 и 35 *кв*. Линии 6 *кв* выполняют главным образом в тех случаях, когда системы с этим напряжением уже

имеются. Новые системы с этим напряжением создают лишь на основе тщательного технико-экономического анализа, показывающего целесообразность применения именно 6 *кв*.

По распределительной сети напряжением до 1000 *в* (НРС) электрическую энергию передают от понизительных подстанций к потребителям. Распределительные сети до 1000 *в* используют обычно внутри населенного пункта. По улице населенного пункта прокладывают линию AB, от которой в дома идут вводы B (рис. 153), а к домам на другой стороне идут отводы Om.

Сети могут быть воздушными или подземными (кабельными). Потребительские сети внутри помещений называют внутренними проводками.

В зависимости от расстояния, на которое передается электрическая энергия, используется то или иное стандартное напряжение. Чем больше расстояние, тем выше должно быть напряжение, на котором передается электрическая энергия. С увеличением напряжения значительно снижаются потери энергии в проводах и расход металла на провода. При одинаковых относительных значениях потери мощности и потери напряжения в сети сечение проводов теоретически получается обратно пропорциональным квадрату напряжения.

Например, если линию низкого напряжения 127 *в* заменить линией 380 *в*, расход проводникового материала уменьшится в 380^2: $127^2=9$ раз, тогда как напряжение повысится всего в 3 раза. Однако практически разница в расходе металла несколько меньше.

Принятые стандартом СССР высокие напряжения даны в таблице 17.

Таблица 17

Стандартные высокие напряжения

Высокое напряжение (*в*)	Ориентировочные расстояния (*км*), на которые целесообразно передавать электроэнергию на данном напряжении	При мощности (*квт*) до
3 000±5%	До 4	1000
6 000±5%	» 10	2000
10 000±5%	» 15	3000
20 000±5%	» 30	5000
35 000±5%	50—20	2 000—10 000
110 000±5%	150—50	10 000—50 000

Далее следуют напряжения 150, 220, 330, 500, 750 *кв*. Создана и введена в действие линия электропередачи на постоянном токе напряжением 800 000 *в*. Планируется построить сверхмощные электрические трассы на постоянном токе из Восточного Казахстана (Экибастуз) в центр европейской части страны протяженностью 2,5 тыс. *км* напряжением 1,5 млн. *в*. Для трасс протяженностью 3,5—4 тыс. *км* (Восточная Сибирь — Урал) будет принято напряжение 2—2,2 млн. *в*.

§ 2. Схемы соединений электрических станций и подстанций

В состав электростанции входят следующие основные части: первичный двигатель, генератор, возбудитель, распределительное устройство.

Общая схема электрических соединений электростанции мощностью до 100 *ква* (схема коммутации) представлена на рисунке 154.

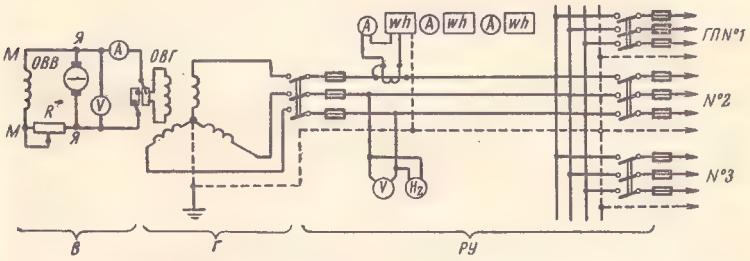


Рис. 154. Полная схема электрических соединений электростанции малой мощности:

Г — генератор; *В* — возбудитель; *РУ* — распределительное устройство; *ГП* № 1 — группа потребителей.

Генератор переменного тока, принцип действия которого был описан выше, приводится во вращение первичным двигателем — тепловым, гидравлическим или ветряным. В качестве возбудителя чаще используется генератор постоянного тока, мощность которого составляет до 3% от мощности генератора. Он дает напряжение постоянного тока для питания обмотки возбуждения генератора *(ОВГ)*.

В цепи обмотки возбуждения возбудителя *(ОВВ)* включен реостат *R* для регулирования величины тока в ней.

Меняя ток в этой обмотке, можно регулировать величину напряжения на щетках якоря возбудителя, а это, в свою очередь, приводит к изменению интенсивности магнитного силового поля полюсов ротора генератора и, следовательно, напряжения на зажимах генератора трехфазного переменного тока.

Распределительное устройство объединяет коммутационную аппаратуру, то есть аппаратуру для изменения схем соединения в электроустановках (включения, выключения и т. д.), измерительные приборы и защитные устройства. Распределительное устройство позволяет независимо распределять электроэнергию между потребителями, защищать генератор от замыканий в сети, измерять электрические величины и вести учет электрической энергии, расходуемой отдельными группами потребителей.

Полную схему электрических соединений с указанием как силовых цепей, так и цепей включения измерительных приборов, защитных аппаратов, коммутационных аппаратов можно выполнить только для электростанций малой мощности, где используется сравнительно мало вспомогательного оборудования. Для станций больших мощностей выполнять полные схемы практически нецелесообразно, так как их трудно вычерчивать и читать. Поэтому схемы разрабатывают и изображают по частям, каждая из которых представляет определенную группу электрических соединений. Так, например, различают два вида схем электрических соединений; первичных, или основных, цепей и вторичных цепей. На схемах первичных цепей изображают генераторы, трансформаторы, выключатели, разъединители и другие элементы, из которых составляется силовая цепь передачи электроэнергии к потребителям. На схемах вторичных цепей изображают электрические соединения вспомогательных цепей, куда относятся схемы включения контрольно-измерительных приборов, реле защиты, сигнализационной аппаратуры и аппаратуры управления.

По форме изображения схемы выполняют однолинейными и трехлинейными. На однолинейных схемах все три фазы силовой цепи изображают одной линией. Это допустимо в связи с тем, что все три фазы обычно имеют одинаковую аппаратуру и аналогичные схемы ее включения. Однолинейными схемами с нанесением

на них всех элементов первичных цепей (генераторов, трансформаторов, реакторов, разъединителей) пользуются при расчете токов короткого замыкания, разработке схем вторичных цепей, конструировании распределительных устройств. Такие схемы для всей установки называются принципиальными однолинейными схемами. Если на однолинейной схеме указаны также контрольно-измерительные приборы, устройства защиты, управления и сигнализации, то такие схемы называют полными однолинейными схемами.

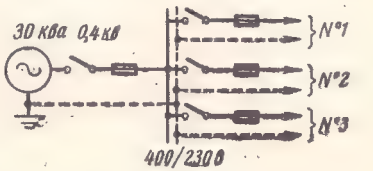


Рис. 155. Однолинейная схема электростанции по рисунку 154.

Трехлинейные схемы, на которых изображены все три фазы, выполняют для отдельных частей электростанции или подстанции при изображении вторичных цепей, например релейной защиты генератора или трансформатора. Их также называют принципиальными схемами вторичных цепей. На рисунке 155 представлена однолинейная схема электростанции, полная схема которой приведена на рисунке 154.

Кроме указанных выше, разрабатывают также монтажные схемы. На монтажной схеме указывают все приборы, реле, устройства и соединительные провода и кабели. Все приборы и аппараты на этих схемах располагают таким образом, чтобы они соответствовали действительному их расположению на щитах и панелях. Этим облегчается дальнейший монтаж элементов электроустановки.

Монтажные схемы являются основным руководством при монтаже и эксплуатации, в частности при определении повреждений, а также при испытаниях и проверках всех вторичных цепей.

§ 3. Классификация электростанций

По виду энергии, используемой первичным двигателем, электростанции делятся на тепловые, гидравлические и ветряные.

Тепловые электростанции в зависимости от вида используемого топлива, в свою очередь, под-

разделяются на электростанции, работающие на твердом топливе (уголь, торф), жидком (мазут, нефть), газовом (естественный или искусственный газ) и на атомной энергии. В качестве первичных двигателей на тепловых электростанциях могут быть использованы паровые турбины, паровые машины, двигатели внутреннего сгорания, газовые турбины. На наиболее мощных тепловых электростанциях используют паровые турбины. Паротурбинные электростанции подразделяются на теплоэлектростанции конденсационные (ТЭС) и теплофикационные (теплоэлектроцентрали — ТЭЦ).

На атомных электростанциях первичными двигателями также являются паровые турбины. Пар получают за счет энергии расщепления атомного ядра.

Конденсационные электростанции предназначаются для снабжения потребителей только электроэнергией.

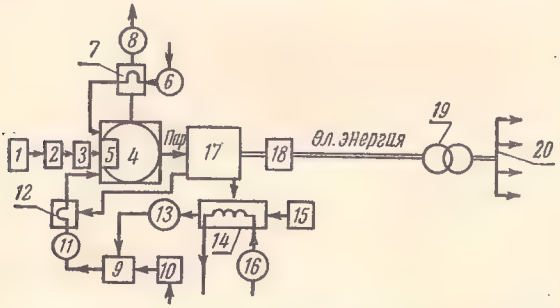


Рис. 156. Схема производственного процесса ТЭС:

1 — склад; *2* — дробильная установка; *3* — пылеприготовительное устройство; *4* — котел; *5* — топка; *6* — вентилятор; *7* — воздухоподогреватель; *8* — дымосос; *9* — бак с водой для питания котла; *10* — устройство для очистки воды; *11* — насос; *12* — подогреватель воды; *13* — насос; *14* — конденсатор; *15* — паровой эжектор для отсасывания воздуха из конденсатора; *16* — насос для охлаждающей воды; *17* — турбина; *18* — генератор; *19* — трансформатор; *20* — электрическая сеть.

Схема технологического процесса этой станции представлена на рисунке 156. Твердое топливо со склада *1* подается в дробильную установку *2*, а оттуда — в пылеприготовительное устройство *3*. На мощных шаровых мельницах раздробленный уголь превращается в пылеобразное топливо. Воздушные транспортеры подают пылевидное топливо в бункер над котлом *4* и оттуда в топку *5*. Специальный вентилятор *6* нагнетает воздух в топку через воздухо-

подогреватель *7*. Воздух подогревается теплом отходящих газов, отсасываемых из топки дымососом *8*. Вода для питания котла *4* из питательного бака *9* нагнетается насосом *11*. По пути в котел вода проходит через подогреватель *12*, где нагревается до 150—170° (под давлением) теплом пара, который отработал в турбине *17*. До поступления в питательный бак вода проходит химическую очистку в устройстве *10*. Часть воды нагнетается из конденсатора *14* насосом *13*. Пар в конденсаторе охлаждается циркуляционной водой, которая насосом *16* забирается из внешнего источника воды и прогоняется через систему труб в конденсаторе. Паровой эжектор *15* отсасывает воздух из конденсатора и создает разряжение. При пониженном давлении в конденсаторе энергия пара используется более полно. Турбина *17* приводит в действие генератор *18*. Электрическая энергия через подстанцию с повысительным трансформатором *19* и распредустройством *20* передается к потребителям.

На конденсационной электростанции наблюдаются значительные потери энергии. Особенно велики потери тепла в конденсаторе, откуда оно циркуляционной водой уносится во внешний водоем. Тепло теряется также в топке, котле, турбине, генераторе. В результате общий к. п. д. составляет не более 24%. Однако в последнее время получили распространение теплоэлектростанции с высокими параметрами давления и температуры пара; коэффициент полезного действия их достигает 40%.

Общий баланс тепла конденсационной электростанции следующий:

общее количество тепла, выделяемого в топке	100%
потери с отходящими газами	10%
потери с золой и шлаком	4%
потери в трубопроводах и турбогенераторе	7%
потери с водой, охлаждающей конденсатор	55%
тепло, полезно превращенное в электроэнергию	24%

Теплоэлектроцентрали предназначаются для теплоснабжения промышленных предприятий и бытовых потребителей. На ТЭЦ совмещаются производственные процессы выработки тепловой и электрической энергии. Теплоснабжение осуществляется благодаря отбору пара из турбины. Этот пар или непосредственно поступает на производство, или (частично) используется предваритель-

но для подогрева воды в специальном бойлере *21* (рис. 157). Вода затем поступает к потребителям тепловой энергии через теплофикационную сеть. Ниже приводится баланс тепла для ТЭЦ:

общее количество тепла, запасенного в топливе	100%
потери с отходящими газами	10%
потери с золой и шлаком	4%
потери в трубопроводах и турбогенераторе	9%
горячая вода для производства и коммунальных нужд .	40%
пар для производственных целей	20%
пар, превращенный в электроэнергию	17%

к.п.д. теплоэлектроцентралей достигает 70% и более.

На атомных электростанциях вместо котла установлен ядерный реактор, в котором за счет энергии цепной реакции деления ядер урана выделяется тепло. Это тепло с помощью теплоносителя, циркулирующего через трубы в реакторе, передается в парогенератор. В основном устройство этой электростанции подобно устройству ТЭС.

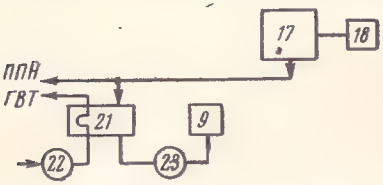


Рис. 157. Особенности технологического процесса на ТЭЦ:

21 — бойлер для подогрева воды; *22* и *23* — насосы; *ППВ* — пар для производственных нужд; *ГВТ* — горячая вода для теплофикации; остальные обозначения те же, что на рисунке 156.

Электростанции с двигателями внутреннего сгорания могут иметь к. п. д. до 35%. Если одновременно используется и тепло охлаждающей двигатель воды, то к. п. д. достигает 65%. Эти электростанции могут работать на жидком или газообразном топливе, в зависимости от типа двигателя.

В настоящее время для сельской электрификации разработаны и осваиваются промышленностью автоматизированные электростанции с дизельными двигателями мощностью до 1000 *квт* (например, дизель-генераторная установка ДГУ-330 на 330 *квт* и т. д.). Автоматизированные стационарные электроагрегаты типа АСДА имеют мощность 5, 12, 20, 30, 50 *квт* и более. Электроагрегат типа АСДА состоит из моноблока двигатель-генератор, щита автоматического управления, узла системы охлаждения двигателя, расходного топливного бака, устройств, обе-

спечивающих пуск и длительную непрерывную работу электроагрегата без обслуживающего персонала. Он устанавливается в закрытом помещении и может быть использован в качестве основного или резервного источника трехфазного переменного тока 50 *гц*.

Эти агрегаты имеют два исполнения: электроагрегаты первой ступени автоматизации АСДА-1 и второй ступени автоматизации АСДА-2. При первой ступени автоматизации непрерывная работа электроагрегата обеспечивается в течение 24 *ч* без обслуживающего персонала, но запуск и нормальный останов выполняет обслуживающий персонал.

На агрегате предусмотрен автоматический аварийный останов (закрытием воздушной заслонки на всасывающем коллекторе двигателя) при срабатывании следующих защит: от разноса двигателя, от токов короткого замыкания и перегрузки, от понижения давления масла в двигателе ниже допустимого, от понижения уровня воды в системе охлаждения, от повышения температуры охлаждающей воды выше допустимой. На параллельную работу АСДА-1 включают вручную. К электростанциям АСДА-2 выпускаются щиты автоматического управления типов ЩАУ2-12, ЩАУ2-20 и ЩАУ2-50.

Вторая ступень автоматизации обеспечивает автоматическое и дистанционное управление электроагрегатами, на расстоянии не более 200 *м* (по кабелю) от щита автоматического управления. Работа без обслуживающего персонала возможна в течение 200 *ч*. Система автоматики обеспечивает аварийный останов закрытием рейки топливного насоса двигателя при коротких замыканиях и перегрузках, при понижении уровня масла или воды ниже допустимого в системах смазки или охлаждения первичного двигателя, а также при повышении температуры охлаждающей воды. От разноса двигателя и незавершенного пуска и останова электроагрегат защищается автоматическим закрытием воздушной заслонки.

Широкое распространение получили передвижные электростанции типа ЖЭС (железнодорожные электростанции), ДЭС (дизельные электростанции) и др. Для электростригальных агрегатов применяются электростанции типа ЭС-7 и др.

Гидроэлектростанции вырабатывают наиболее дешевую электроэнергию. При строительстве гидро-

сооружений ГЭС решается ряд других народнохозяйственных задач: улучшаются условия судоходства, орошаются и обводняются засушливые земли и т. д.

В своем устройстве и в эксплуатации ГЭС значительно проще, чем ТЭС. К. п. д. ГЭС достигает 80—90%. Однако первоначальная стоимость, то есть стоимость сооружения гидроэлектростанций, значительно превышает стоимость сооружения тепловых электростанций одинаковой мощности. Это связано с огромным объемом земляных и строительных работ. Значительно продолжительнее и сроки сооружения ГЭС, но расходы на эксплуатацию в конечном счете меньше на ГЭС. Значительно ниже и стоимость 1 *квт·ч*, полученного на гидроэлектростанции.

Энергетический баланс для ГЭС:

запас энергии в верхнем уровне ГЭС	100%
потери на испарение, сброс и фильтрацию	4%
потери в сооружении, турбине и генераторе	11%
потери на повысительной подстанции и в линиях	7%
полученная электроэнергия	78%

Гидроэлектростанции бывают п р и п л о т и н н ы е и д е р и в а ц и о н н ы е. Напор воды при помощи плотины обычно создают на равнинных реках. На горных реках, которые имеют большой уклон, строят деривационные гидроэлектростанции. Вода из реки по деривационному каналу и напорному трубопроводу подводится к турбинам ГЭС, расположенной у подножия склона.

На в е т р о э л е к т р о с т а н ц и и энергия ветра ветровыми двигателями преобразуется в механическую. Ветродвигатель приводит в действие генератор.

В отдаленных районах маломощные ветроэлектростанции используются для электроснабжения радиоприемных и передающих устройств. Такая электростанция имеет генератор постоянного тока, который заряжает аккумуляторы. Последние включены буферно — параллельно генератору постоянного тока. В ветреную погоду аккумуляторы заряжаются, и энергия расходуется от генератора. В безветрие на нагрузку разряжаются аккумуляторы. Ветроэлектростанции в сельском хозяйстве распространения не получили. Однако ветряные двигатели широко используются для приведения в действие мельничных установок, насосов и других рабочих машин.

§ 4. Графики нагрузок источника электроснабжения

Для проектирования электрификации хозяйства, планирования электропотребления в существующих электрифицированных хозяйствах и для выявления условий эксплуатации электрооборудования на электростанциях и понизительных трансформаторных подстанциях необходимо иметь сведения о величинах потребляемой мощности в различные сезоны года и в различные часы суток. Режим работы электростанции или трансформаторной подстанции (ТП) постоянно меняется в зависимости от суммарной мощности, потребляемой всеми токоприемниками.

Режим работы отдельных потребителей также не остается постоянным, он меняется по часам суток и по сезонам. Например, электроосветительная нагрузка имеет максимальное значение в вечерние часы. Зимой осветительная нагрузка включена более продолжительное время, чем летом, и ее абсолютная величина мощности больше в те же часы. Силовая нагрузка в течение рабочего дня также меняется в зависимости от характера работы.

Наглядное представление о нагрузке электростанции (или трансформаторной подстанции), что одновременно характеризует и спрос на электрическую мощность со стороны потребителей, дают г р а ф и к и н а г р у з о к. Они могут быть составлены в виде таблиц изменения мощностей по часам суток, а также вычерчены графически, что является более наглядным. Различают графики активной и реактивной нагрузок. Составляют графики суточные, недельные, годовые. На суточных графиках по оси ординат откладывают мощности, потребляемые на станции в зависимости от времени в течение суток. На недельных, месячных и годовых графиках по оси ординат обычно откладывают максимальные мощности станции в различные дни недели или месяцы года. Пример суточного графика представлен на рисунке 158, *а*. По горизонтальной оси отложены часы суток, а по вертикальной — мощность, потребляемая каждый час.

Располагая графиками нагрузок, можно проанализировать работу станции, определить наиболее экономичные варианты ее работы в зависимости от времени суток или месяца года, выяснить степень загрузки агрегатов и воз-

можность наиболее рационально распределить нагрузку между отдельными агрегатами.

При разработке проекта электроснабжения графики нагрузок рассчитывают для отдельных групп потребителей, например для потребителей осветительной нагрузки, для потребителей силовой нагрузки по различным объектам. Общий суммарный график нагрузки определяют путем наложения отдельных графиков.

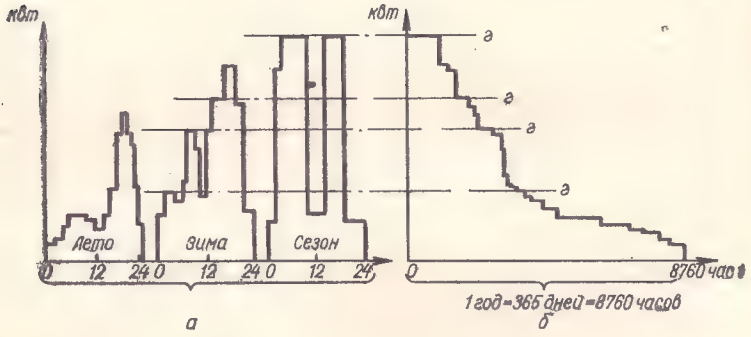


Рис. 158. Графики нагрузок:
а — суточные (летний, зимний, сезонный); *б* — годовой по продолжительности; *г* — вспомогательные горизонтальные линии.

Пользуясь графиками нагрузок, можно вычислить ряд технико-экономических показателей по электрификации. Так, площадь графика соответствует выработке электроэнергии за данные сутки. Поделив эту выработку на 24 *ч*, находят среднюю нагрузку $P_{ср}$ за сутки.

Если речь идет о графике потребительской установки, то таким образом определяется потребляемая за сутки электроэнергия.

Отношение площади графика к площади, полученной умножением совмещенного максимума графика на 24 *ч*, называется коэффициентом равномерности или коэффициентом заполнения графика. Этот коэффициент также равен отношению средней мощности к максимальной.

Следует стремиться к максимальному увеличению коэффициента заполнения графика, так как при этом лучше используются установки по электроснабжению, вырабаты-

вается больше электроэнергии, а поэтому снижается ее себестоимость.

Одно из лучших средств увеличить коэффициент заполнения графика при электроснабжении от гидроэлектростанций — это использование электротепловых установок, работающих по принципу аккумулирования тепла и включаемых в часы провалов в графике.

§ 5. Годовые графики и их анализ

Различают два вида годовых графиков: годовой график по продолжительности и годовой график помесячных максимумов нагрузок. Годовой график по продолжительности позволяет уточнить годовую выработку электроэнергии, правильно выбрать число агрегатов электростанции или трансформаторов на подстанции, определить режим работы каждого агрегата или трансформатора.

Годовой график по продолжительности строят по суточным графикам, летнему и зимнему. А при наличии характерного сезонного графика используют и его. Наиболее точную картину распределения мощностей в течение года дает график по продолжительности, построенный по пяти суточным графикам: летнему, осеннему, зимнему, весеннему и сезонному. Сезонный график может быть рассчитан на небольшое число дней в году. Но не учесть его нельзя, так как это может привести к большим ошибкам, например, при выборе трансформатора и при построении годового графика по продолжительности.

Годовой график по продолжительности строят в такой последовательности (рис. 158, *б*). Суточные графики, вычерченные в одном масштабе, располагают рядом. Справа от них строят оси координат для графика по продолжительности. На оси абсцисс в масштабе откладывают число часов в году — 8760. Проводят ряд горизонталей (*г*), которые пересекают все графики. Каждая горизонталь соответствует определенной мощности. На графике по продолжительности на соответствующих горизонталях откладывают число часов, полученное как сумма произведений для каждого графика числа часов действия данной нагрузки в сутки на число суток в году, в течение которых действует данный график нагрузки. Для удобства расчетов пользуются следующей таблицей.

Мощности нагрузки, соответствующие горизонталям, P_x	Число часов участия мощности нагрузки P_x в суточном графике					Число часов длительности мощности P_x за год, t_x
	весна t_1	лето t_2	осень t_3	зима t_4	сезон t_5	

Обычно принимают, что число дней работы графиков весеннего, летнего, осеннего и зимнего одинаково и равно

$$n = \frac{365 - n_{сез}}{4} \text{ дней},$$

где $n_{сез}$ — число дней работы по сезонному графику.

Число часов длительности мощности P_x определяется так:

$$t_x = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)\frac{365 - n_{сез}}{4} + n_{сез} t_5.$$

Это значение t_x, полученное для каждой из горизонталей, откладывают на графике по продолжительности. Соединяя затем полученные точки кривой, получают годовой график по продолжительности.

Площадь, ограниченная кривой и осями координат, равна годовой выработке электроэнергии, или годовому потреблению ($A_{год}$). Отношение $A_{год}$ к произведению $8760 \cdot P_{max}$ называется коэффициентом заполнения графика.

Годовой график помесячных максимумов нагрузок составляют преимущественно для гидроэлектростанций. С его помощью увязывают потребляемую мощность с мощностью водотока и решают вопросы сезонного регулирования.

Один из показателей работы электростанции — годовое число часов использования установленной мощности электростанции $T_{год}$. Оно показывает, сколько часов должна проработать электростанция с нагрузкой, равной установленной мощности станции $P_{уст}$, чтобы выработать количество энергии, равное выработанному станцией за год — $A_{год}$.

$$T_{год} = \frac{A_{год}}{P_{уст}}.$$

Средняя себестоимость S_c 1 *квт·ч* энергии (в руб.) может быть определена как частное от деления

годовых расходов на эксплуатацию станции $\Sigma S_{год}$ (в руб.), состоящих из амортизационных отчислений и текущих расходов, на число *квт·ч*, полезно отпущенных за год — $A_{год.\ пол}$:

$$S = \frac{\Sigma S_{год}}{A_{год.\ пол}} \text{ руб/квт·ч.}$$

Глава XV

Аппаратура управления, используемая в электроустановках

§ 1. Рубильники и переключатели

В качестве аппаратов для включения, переключения и выключения цепей постоянного и переменного тока в сетях 127/220 *в* и 220/380 *в* используются рубильники, переключатели, пакетные выключатели, контакторы, магнитные пускатели и автоматические выключатели.

Рубильник — простейший аппарат для включения и отключения цепей напряжением до 1000 *в*. Рубильники могут исполняться одно-, двух- и трехполюсными. По конструкции рубильники могут быть открытого типа, предназначенные для компоновки распределительных устройств станций и подстанций, и рубильники с защитными кожухами для отдельных электрических установок. Рубильники предназначены для нечастой коммутации.

По сокращенной номенклатуре низковольтных электрических аппаратов и изделий для применения их в комплектных устройствах выпускаются следующие типы аппаратов управления.

Рубильники на номинальный ток 100—600 *а* типа Р выпускают одно-, двух- и трехполюсными. В обозначении, например, Р24 цифра 2 означает двухполюсный, 4—400 *а*; Р36 — трехполюсный на 600 *а*. Для привода этих рубильников используют центральную рукоятку с передним или задним присоединением. Рубильники на ток 100—600 *а* с центральным рычажным приводом типа РПЦ выпускают двух- и трехполюсными (рис. 159).

Рубильники на 800—1500 *а* также обозначают буквой *Р*, но с четырехзначной цифрой для указания данных аппарата. Управляют ими либо центральной рукояткой,

либо штангой, либо маховичным приводом. Переключатели на ток 100—600 *а* обозначают буквой П с двумя цифрами, например П21 — двухполюсный на 100 *а*, если для привода используется центральная рукоятка, или буквами ППЦ, если привод центральный рычажный. Переключатели на 800—1500 *а* обозначают буквой П с четырехзначным числом. Рубильники и переключатели с боковой рукояткой обозначают соответственно РБ, РПБ, ПБ, ППБ, а рубильники с управлением штангой — РШ.

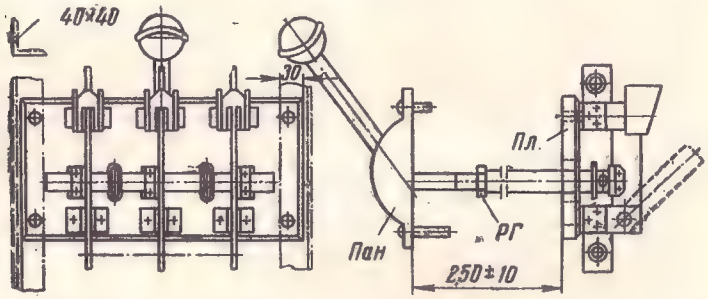


Рис. 159. Эскиз рубильника РПЦ с рычажным центральным приводом:

РГ— гайка, регулирующая расстояние между панелью *Пан* и плитой *Пл.*

Рубильники некоторых типов имеют дугогасительные камеры. Предельный отключаемый ток рубильников и переключателей без дугогасительных камер составляет до 30% номинального при 380 *в* в сети переменного тока. При 500 *в* отключать цепи под током не допускается. Если у рубильников и переключателей есть дугогасительные камеры, то при напряжении до 380 *в* допускается отключать номинальный ток, а при 500 *в* — 50% номинального.

Для пуска трехфазных электродвигателей мощностью до 4,5 *квт* (например, в электростригальных агрегатах) применяются нажимные (ручные) пускатели типа ПНВ-30 (32 или 34), представляющие собой небольшой рубильник закрытого типа, ножи которого включаются и выключаются при нажатии соответствующей кнопки. Первая цифра означает «трехполюсный», вторая: О — открытого исполнения, *2*— защищенного, *4*— пыле-водонепроницаемого. Нажимные пускатели ПНВС-10 (12 или 14) предназначены для пуска однофазных электродвигателей до 0,6 *квт*.

Тип рубильника для электроустановки выбирают по номинальному напряжению и предельному выключаемому току.

§ 2. Пакетные выключатели

Пакетные выключатели применяются наряду с рубильниками в сухих непыльных помещениях для управления силовыми и осветительными цепями низкого напряжения небольшой мощности. Они применяются также для переключения вольтметров с одного линейного или фазного напряжения на другое и т. д. На рисунке 160 представлены эскиз и схема включения трехполюсного пакетного выключателя ПВ-3. Выключатель состоит из отдельных пакетов, каждый из которых образует один полюс, включаемый в одну цепь выключателя. Каждый пакет имеет свое положение неподвижных контактов, сдвинутое по отношению к контактам других пакетов. В пакетных выключателях имеется механизм мгновенного переключения: скорость операции включения не зависит от скорости вращения рукоятки пакетного выключателя. Электрическая цепь на каждом полюсе разрывается в двух местах при большой скорости размыкания. Поэтому при небольших размерах выключателя можно разрывать значительные токи. Выключатели выпускаются на токи (величина пакетника) до 10, 25, 60, 100 *а* и т. д. при напряжении до 250 *в*. Если напряжение в сети 380 *в*, то номинальные токи не должны превосходить 60% указанных.

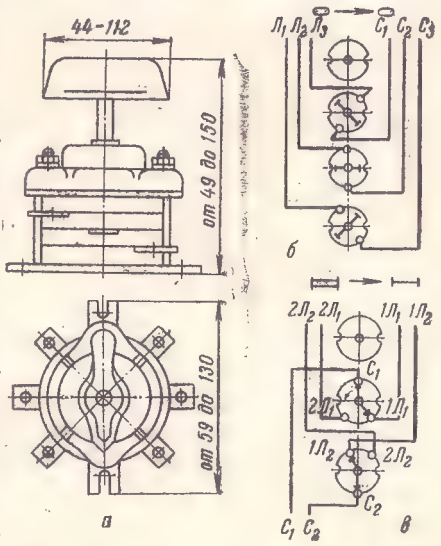


Рис. 160. Пакетные выключатели:
а — эскиз трехполюсного пакетного выключателя типа ПВ-3; *б* — схема включения трехполюсного пакетного выключателя; *в* — схема коммутации переключателя типа ПП-2-10/Н2 на 2 направления.

Обозначение пакетного выключателя, например ПВ3-100, означает: трехполюсный, номинальный ток 100 *а* при напряжении в сети 220 *в*, открытого исполнения; ВПК3-25— трехполюсный, 25 *а*, защищенного исполнения; ГПК2-60 — двухполюсный, 60 *а*, герметического исполнения и т. д.

На рисунке 160, *в* представлена схема пакетного переключателя типа ПП2-10/Н2 — переключателя двухполюсного с величиной отключаемого тока 10 *а* при напряжении до 250 *в*, на два направления. Отводы *Л* включают в линию, к отводам *С* подключают силовую или осветительную нагрузку.

Барабанные переключатели серий БП1, БП и БПК предназначаются для ручного включения, отключения и реверсирования короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, для переключения полюсов у многоскоростных электродвигателей и т. д. Существует большое число схем переключений. Среди них различают переключатели с 2, 3, 4 и 5 положениями рукоятки; переключатели для числа цепей от 3 до 18; переключатели с номинальной нагрузкой 2,5; 5; 10; 35; 50 *а* и т. д.

В некоторых пакетных переключателях, например в переключателях со звезды на треугольник (типа ЗТ), рукоятка вращается только в одном направлении, во избежание ошибок при пуске электродвигателей. Из нейтрального положения переключатель включает обмотки двигателя только в «звезду», а затем может последовать только схема «треугольник», после этого при следующем повороте двигатель выключается. Достоинством пакетников является то, что они изготавливаются из стандартных элементов; недостатком — малый срок службы, так как выступы фиксирующей шайбы быстро изнашиваются.

Универсальные переключатели для различного рода переключений в цепях управления, измерения и контроля для нормальных помещений обозначаются УП5300; для работы во влажных помещениях — УП5400.

§ 3. Воздушные автоматические выключатели (автоматы)

Автоматические воздушные выключатели применяются в установках до 1000 *в*. Они предназначены для автоматического отключения электроустановок при возникнове-

нии в них перегрузок сверх допустимого предела, при коротких замыканиях, при исчезновении или снижении напряжения ниже нормы, а также для нечастой коммутации в нормальных режимах. В них возможно ручное или автоматическое выключение. Автоматы снабжены механизмом свободного расцепления. Принцип действия механизма расцепления следующий (рис. 161). При включенном положении автомата (токовая цепь *АБ*) система ломающихся рычагов *1—2—3* расположена так, что ось *О* лежит несколько ниже прямой, соединяющей шарниры *х* и *у*. Если сердечник расцепителя *С* ударит рычаг *2* снизу, то механизм займет положение, показанное на рисунке 161,*б*. При этом у некоторых автоматов рукоятка *3* остается во включенном положении. Чтобы вновь включить автомат, ее надо отвести книзу и затем поднять кверху. Механизм свободного расцепления может иметь и другое устройство.

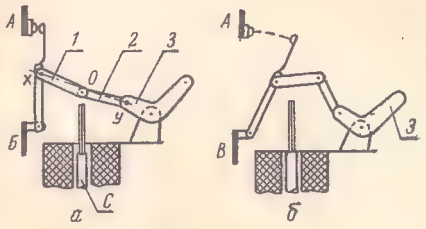


Рис. 161. Механизм свободного расцепления автомата:
АБ — цепь тока силовой цепи; *1, 2, 3* — система ломающихся рычагов; *х, о, у* — шарниры рычагов; *С*—сердечник катушки расцепителя.

На рисунке 162 приведена схема конструкции трехполюсного воздушного автомата с тремя расцепителями, два из них (*1* и *2*) срабатывают при больших токах перегрузки или короткого замыкания, а третий (*3*) — при снижении напряжения ниже заданного уровня. Максимальные расцепители *1* и *2* действуют при протекании в основной цепи, а следовательно, и в катушках расцепителей большого тока перегрузки или короткого замыкания. При этом сердечник катушки расцепителя притягивает якорь расцепителя *4* и рычаг *5* ударяет по защелке *6* механизма расцепителя. Контакты в силовой цепи под действием пружины *7* отключаются. В расцепителе *3* при нормальном напряжении в сети рычаг-якорь *8* удерживается в притянутом состоянии. Когда напряжение в сети упадет ниже заданного уровня, рычаг *8* под действием пружины *9* выведет из зацепления защелку *6*. Автомат отключится. Регулируя натяжение пружин *9* и *10*, можно менять вели-

чины напряжения и токов, при которых срабатывает автомат. Автомат можно выключить нормально замкнутой кнопкой *11*. При ее нажатии размыкается цепь катушки расцепителя *3* и автомат отключается. Вместо кнопки *11* можно включить нормально замкнутые контакты реле защиты, находящегося вне автомата.

Автоматы, предназначенные для работы в сельских системах 380/220 *в* с заземленной нейтралью (нулевым проводом), должны иметь три максимальных расцепителя — на каждой фазе. В них включены также блокировочные

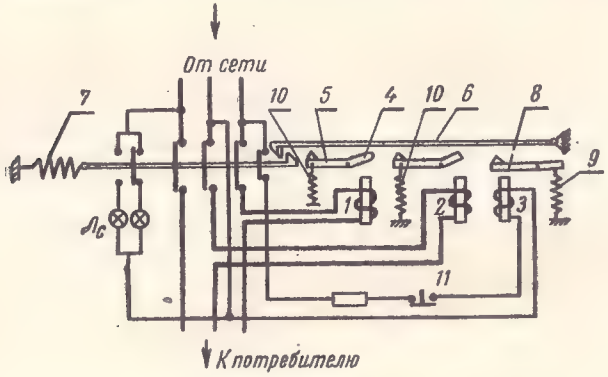


Рис. 162. Схема включения трехполюсного воздушного автомата с тремя расцепителями:

1 и *2* — максимальные расцепители; *3* — минимальный расцепитель (срабатывает при снижении или исчезновении напряжения); *4* — якорь, притягиваемый к сердечнику *1* при обтекании катушки током перегрузки; *5* — рычаг, ударяющий по защелке; *6* — механизм расцепления; *7* — пружина, размыкающая силовые контакты при срабатывании автомата; *8* — рычаг минимального расцепителя; *9* и *10* — пружины; *11* — кнопка отключения автомата.

контакты для ламп сигнализации $Л_с$. Левая лампа загорается тогда, когда автомат выключен, а правая — когда автомат включен.

Автоматы серии АВ выпускают для постоянного тока двухполюсными, а для переменного — трехполюсными на напряжение до 380 *в*. Обозначение автомата серии АВ, например АВ-4СВТВ, расшифровывается следующим образом: АВ — автоматический выключатель, 4-й величины, то есть величина тока до 400 *а* (АВ-10 — до 1000 *а*, АВ-15 — до 1500 *а*, АВ-20 — до 2000 *а*), С — селективный (Н — неселективный, Б — без выдержки времени), В — выдвижной, ТВ — тропическое исполнение (М — морское ис-

полнение). Эти автоматы приводятся в действие рукояткой или рычагом, а также могут иметь электромагнитный или электродвигательный привод.

Главные контакты разрывают токи в дугогасительных или искрогасительных камерах с деионной решеткой. Дугогасительные камеры состоят из асбоцементных (или керамических) перегородок и омедненных стальных пластин, вставленных в эти камеры перпендикулярно плоскости расположения и движения главных контактов автомата при размыкании.

При размыкании больших токов образуется электрическая дуга, которая под действием магнитного поля, возбуждаемого током самой дуги, втягивается в искрогасительные камеры, разбивается на отдельные участки и интенсивно гасится. Гашение происходит главным образом благодаря деионизации дугового промежутка. Токоведущие частицы воздуха — ионы — при прохождении через дугогасительную решетку соприкасаются с омедненными пластинами этой решетки и нейтрализуют свой заряд, получая свободный электрон с поверхности металлической пластины (деионизация). Поэтому дугогасительная решетка иногда называется деионной решеткой.

В некоторых автоматах вместо стальных пластин в деионной решетке используют медные пластины. В некоторых автоматах есть устройства магнитного дутья, которые способствуют более интенсивному втягиванию дуги в дугогасительные камеры и, следовательно, более интенсивному гашению дуги.

Установочные автоматы А3100 выпускают одно-, двух- и трехполюсными с пределами номинальных токов уставки расцепителей от 15 до 600 *а*. В этих автоматах могут быть тепловые расцепители, которые защищают установку только от перегрузок. При коротких же замыканиях они не срабатывают мгновенно, поэтому последовательно с ними надо устанавливать и предохранители. В этих автоматах могут быть также или электромагнитные расцепители, или комбинированные, состоящие из электромагнитного и теплового расцепителей. Если в автомате только электромагнитный расцепитель, то он способен отключать установку только при коротких замыканиях и не отключает ее от перегрузок. Если же расцепители комбинированные, то электромагнитный отключает при коротких замыканиях, а тепловой — при перегрузках.

Автоматические включатели типа АП50 для цепей с номинальными токами до 50 *а* также предназначены для автоматического отключения цепей при возникновении в них опасных перегрузок или коротких замыканий. Для защиты от перегрузок в них имеются тепловые расцепители, а для защиты от коротких замыканий — электромагнитные. Если в автомате только тепловой расцепитель, он имеет марку (номенклатурное обозначение) АП50-3Т; если электромагнитный, — АП50-3М; если же тепловой и электромагнитный, то АП50-3МТ. Цифра *3* означает «трехполюсный». Автомат типа АП50-2 — двухполюсный для постоянного тока. В автомате АП50 могут быть установлены тепловые расцепители на номинальные токи (с регулированием уставки в пределах от 63 до 100% их значений): 1,6; 2,5; 4; 6,4; 10; 16; 25; 40; 50 *а*. Гарантийный срок службы составляет 20 000 включений и отключений при номинальных значениях тока и напряжения.

Автоматы АК50 и АК63 выпускают двух- и трехполюсными со шкалой номинальных токов расцепителей от 0,6 до 50 *а* и от 0,63 до 63 *а* соответственно; рабочее напряжение переменного тока 440 *в*, постоянного —220 *в*.

Для цепей постоянного тока выпускают также однополюсные автоматы АО15 (шкала токов расцепителя от 1 до 20 *а*) и др.

Для укомплектования осветительных цепей применяются однополюсные автоматы АБ-25 (автомат бытовой) на токи 10—25 *а*. Их используют взамен плавких предохранителей и выключателей. Изготавливают также пробки-автоматы (см. гл. XVI, § 6).

§ 4. Электромагнитные контакторы переменного тока. Магнитные пускатели

К о н т а к т о р ы переменного тока серии КТ предназначены для дистанционного включения и отключения электрических установок. Они рассчитаны на номинальные токи от 75 до 600 *а*. В зависимости от тока контакторы различают по величине. КТ-II (второй величины) предназначены для цепей с номинальными токами до 75 *а*, КТ-III—до 150 *а*, КТ-IV— до 300 *а* и КТ-V — до 600 *а*.

На рисунке 163 представлена схема включения контактора. При нажатии на кнопку *Пуск* катушка контактора *К* оживляется током и к ней притягивается магнитная система *М*, которая вызывает замыкание контактов *КС* в силовой цепи. Одновременно замыкаются блок-контакты *БК*. При нажатии на кнопку *Стоп* цепь катушки размыкается и якорь магнитной системы отпадает. Силовые контакты размыкаются. В контакторах, как и в автоматах, имеются дугогасительные камеры с деионными решетками.

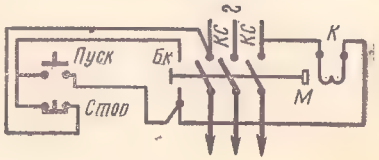


Рис. 163. Схема включения контактора:
КС — силовые контакты; *БК* — блокировочные контакты; *М* — магнитная система, притягиваемая катушкой *К*.

Контакторы могут иметь серебряные контактные поверхности в месте размыкания контактов. Это требуется в том случае, когда нельзя допустить изменения тока в результате увеличения сопротивления контактов из-за их подгорания. Окись серебра хорошо проводит ток, в то время как окись меди имеет большое сопротивление. В последнее время нашли применение также металло-керамические контакты.

В таблице 18 даны предельные мощности электродвигателей, которые можно включать и отключать при помощи контакторов с дугогасительными камерами.

Таблица 18

Предельные мощности электродвигателей для контакторов II—V величин

Величина контактора	Мощность (*квт*) при напряжении (*в*)			
	127	220	380	500
II	10	20	30	30
III	20	40	65	75
IV	—	75	130	150
V	—	150	250	300

Контакторы, которые применяют для изменения направления вращения (реверсирования), называются реверсивными.

Контакторы переменного тока с замыкающими главными контактами, рассчитанные на малую мощность, и контакторы на большую мощность, имеющие встроенную тепловую защиту от перегрузок, называются магнитными пускателями. В них есть одна пара блок-контактов. Дополнительно могут быть установлены блокировочные контакты для цепей управления и сигнализации. Магнитные пускатели включают и выключают при помощи кнопочной станции. Магнитные пускатели выпускают для управления двигателями мощностью от 1,1 до 75 *квт*, напряжением от 127 до 500 *в*.

Магнитные пускатели используют для местного и дистанционного включения и выключения электродвигателей, а также для защиты от перегрузок или самопроизвольного включения после снятия напряжения. Реверсивные магнитные пускатели (сдвоенные) предназначены для изменения направления вращения двигателя. В них имеется механическая (или электрическая) блокировка от одновременного включения.

Для защиты электроустановки от коротких замыканий последовательно силовым контактам магнитного пускателя устанавливают предохранители, которые должны быть рассчитаны на ток, не превышающий четырехкратного тока теплового реле. В противном случае при коротком замыкании может сгореть нагревательный элемент теплового реле.

Промышленность выпускает магнитные пускатели типа П6, ПА вместо серии П и др. Следующие за буквой цифры в обозначении магнитного пускателя означают: первая цифра — величина магнитного пускателя; вторая цифра — исполнение магнитного пускателя по роду защиты от окружающей среды (1 — открытое исполнение; 2— защищенное); третья цифра — электрическое исполнение (1 — нереверсивный пускатель без тепловых реле; 2— то же, с тепловыми реле; 3— реверсивный без тепловых реле; 4 — то же, с тепловыми реле). Так, магнитный пускатель ПА322 означает — 3-й величины, защищенного исполнения (2), нереверсивный, с тепловыми реле (2). В таблице 19 приведены магнитные пускатели серии ПА.

Магнитные пускатели ПА отличаются от пускателей серии П более износоустойчивыми контакторами (10 млн. включений против 1 млн. у серии П), а также более надежными тепловыми реле (типа ТРН и ТРП).

Таблица 19

Классификация магнитных пускателей серии ПА

Величина	Максимальная мощность (*квт*) при напряжении (*в*)			Классификация и типовые обозначения пускателей			
				открытое исполнение		защищенное исполнение	
	220	380	500	нереверсивное	реверсивное	нереверсивное	реверсивное
3	10	20	28	ПА-311, ПА-312	ПА-313, ПА-314	ПА-321, ПА-322	ПА-323, ПА-324
4	14	28	—	ПА-411, ПА-412	ПА-413, ПА-414	ПА-421, ПА-422	ПА-423, ПА-424
5	40	55	—	ПА-511, ПА-512	ПА-513, ПА-514	ПА-521, ПА-522	ПА-523, ПА-524

Магнитные пускатели типа ПМЕ-100 и ПМЕ-200 — малогабаритные — рассчитаны соответственно на ток 10 и 25 *а*.

Магнитные пускатели типа МПК предназначены для работы как в непрерывном режиме, так и в повторно-кратковременном, при числе включений не более 600 в час. Магнитные пускатели этого типа выполняют следующих модификаций: МПК-0 — нереверсивный магнитный пускатель на ток рабочих контактов до 10 *а*; МПК-1 — нереверсивный на ток до 25 *а*; МПКР-0 — реверсивный магнитный пускатель на ток до 15 *а*; МПКР-1 — реверсивный на ток до 25 *а*.

Магнитные пускатели ПМИ — малогабаритные, открытые, нереверсивные — выпускают трех величин: ПМИ-0 для двигателей до 1,1 *квт*, 380 *в*; ПМИ-1 —до 4 *квт*, 380 *в*; ПМИ-2 — до 10 *квт*. Магнитные пускатели ПМЕ и ПМИ рекомендуется использовать в схемах автоматики как промежуточные реле.

Схема включения магнитного пускателя аналогична схеме включения контактора. Двигатель включают нажатием кнопки *Пуск* на кнопочной станции типа КС или КУ.

Принципиальная схема включения магнитного пускателя с тепловым реле представлена на рисунке 164, *а*.

Схема работает следующим образом. При нажатии на кнопку *Пуск* оживляется током цепь: $Л_3$ — катушка $К$ — контакт II — кнопка *Пуск* — кнопка *Стоп* — $Л_1$. Катушка оживляется током и притягивает якорь вместе с подвижными контактами, которые замыкают неподвижные контакты $Л_1$ и $С_1$, $Л_2$ и $С_2$, $Л_3$ и $С_3$, а также блокировочные контакты I и II. Блокировочные контакты I и II включены параллельно кнопке *Пуск*. Они заменяют кнопку *Пуск* после момента включения. Ток протекает по цепи: $Л_3$ — катушка — блок-контакты I и II — кнопка *Стоп* — кон-

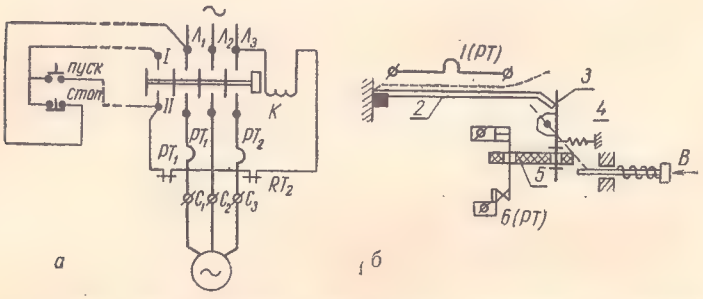


Рис. 164. Схема включения магнитного пускателя (*а*) и устройство теплового реле (*б*):

РТ — тепловое реле; *I—II* — блокировочные контакты; *1* — нагревательный элемент *РТ*, включаемый в цепь силового тока; *2*— биметаллическая пластина; *3* — рычаг; *4* — пружина; *5* — тяга; *6* — контакты *РТ*, стоящие в цепи управления (в цепи катушки магнитного пускателя).

такт $Л_1$. При нажатии на кнопку *Стоп* цепь тока через катушку прерывается и магнитный пускатель размыкает свои контакты, отключая токоприемник от сети. Магнитный пускатель отключается также при перегрузке, когда размыкаются контакты теплового реле *РТ*.

Основные преимущества магнитного пускателя перед рубильником следующие.

1. Облегчается управление электроустановкой. Можно управлять на расстоянии — дистанционно. Кнопочную станцию с магнитным пускателем соединяют три провода небольшого сечения, так как по ним протекает ток катушки порядка 0,1—0,3 *а*.

2. Обеспечивается нулевая защита, то есть защита от исчезновения напряжения в сети или его значительного снижения — до 50—60% номинального. Катушка

не удерживает магнитную систему, и контакты размыкаются, токоприемник отключается. После восстановления напряжения токоприемник остается отключенным. Чтобы его включить, надо снова нажать кнопку *Пуск*. Если бы на месте магнитного пускателя стоял рубильник, то после восстановления напряжения в сети произошло бы самопроизвольное включение. Такое самопроизвольное включение в ряде случаев может привести к поломке машины, выходу из строя электродвигателя (например, при самовключении двигателя кормоприготовительного комбайна, когда корнеклубнемойка и транспортер загружены), а также к несчастным случаям (например, при самовключении токарного станка, когда происходит смена обрабатываемой детали).

3. Обеспечивается защита от перегрузок путем использования тепловых реле *РТ* (рис. 164, б). Нагревательный элемент реле *1* включается в цепь тока двигателя. Нагревательный элемент — сменная деталь. Его выбирают в зависимости от номинального тока нагрузки (двигателя).

При перегрузке двигателя нагревательный элемент за короткое время разогревается до высокой температуры и нагревает стоящую рядом биметаллическую пластинку *2*, которая изгибается (показано пунктиром) при нагреве и освобождает рычажок *3*. Последний под воздействием пружины *4* оттягивает тягу *5*, которая размыкает контакты *6*, стоящие в цепи катушки магнитного пускателя. Электродвигатель отключается. Спустя некоторое время биметаллическая пластина охладится, и тепловое реле может быть возвращено в готовое к действию состояние. Для этого нажимают кнопку *В*, которая обычно выведена наружу кожуха магнитного пускателя. При нажатии кнопки *В* биметаллическая пластина *2* после остывания входит под рычажок *3*, контакты *6* замыкаются.

В магнитных пускателях серии П, получивших наибольшее распространение в сельском хозяйстве, применяются тепловые реле серии РТ со сменными нагревательными элементами.

Для магнитных пускателей ПМИ, ПМЕ и ПА-300 предназначаются двухполюсные тепловые реле серии ТРН. Они имеют температурную компенсацию, то есть их работа почти не зависит от окружающей температуры. Возврат — ручной. Нагревательные элементы —

сменные. Значения номинальных токов нагревательных элементов ТРН даны в таблице 20.

Таблица 20

Тип реле	ТРН-10 (ТРН-10А)	ТРН-25	ТРН-40
Номинальный ток нагревательных элементов (*а*)	(0,32; 0,4); 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,5; 6; 8; 10	5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	12,5; 16; 20; 32; 40

Эти реле имеют регулировку тока уставки в пределах ±25% через интервал 5%. При нажатии кнопки *Возврат* через 1—2 минуты после срабатывания реле оно возвращается в исходное положение.

При перегрузке на 20% реле должно отключать установку не более чем за 20 минут.

В магнитные пускатели ПА 4—6-й величин встраиваются по два однополюсных тепловых реле серии ТРП. Они имеют несменяемые нагревательные элементы, самовозврат, а также ручной ускоренный возврат.

Одноэлементные пристраиваемые реле ТРА и ТРВ с несменяемыми элементами и самовозвратом применяются на станциях управления.

Для надежной защиты электродвигателей тепловые реле магнитных пускателей необходимо настраивать на специальном стенде, схема которого представлена на рисунке 165. Стенд выполнен на основе трансформатора безопасного освещения ОСО-0,25, вторичная обмотка которого не используется, а в свободное окно между катушкой и сердечником вкладываются 6 витков медного провода сечением 16 *мм*^{2} (например ПР16). Этим же проводом выполняют всю вторичную цепь, соединенную при помощи хорошо припаянных латунных наконечников. Для настройки тепловое реле ТР снимают с магнитного пускателя и подключают к стенду, как показано на рисунке. Включив рубильник *1* и перемещая движок реостата *5*, при замкнутом рубильнике *10* устанавливают ток, равный шестикратному номинальному току электродвигателя, для защиты которого предназначено реле, и выключают рубильники *1* и *10*. Затем снова включают рубильник *1* и электросекундомер *4*. Если электросекундомера нет, пользуются ручным секундомером. При срабатывании защиты погасает лампа *3*. При шестикратном токе защита должна отключать электро-

двигатель за 9—11 секунд, при полуторакратном токе — за 2—3 минуты. Если защита срабатывает за большее время, то следует сблизить нагревательный элемент *Н* и биметаллическую пластину расцепителя контактов управления.

Если нагревательные элементы заводского исполнения отсутствуют, их нужно изготовить из нихромовой про-

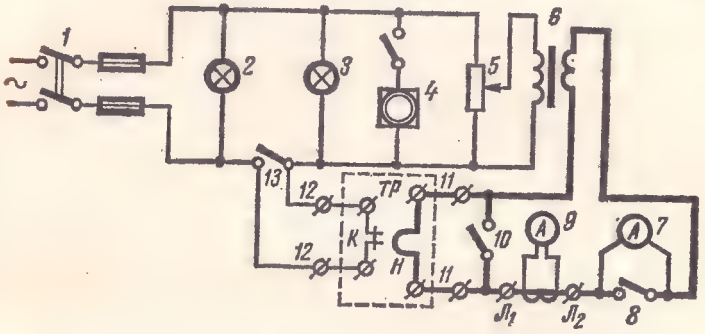


Рис. 165. Схема стенда для настройки тепловых реле:

1 — рубильник или выключатель с предохранителями; *2* — сигнальная лампа «Напряжение на стенд включено»; *3* — сигнальная лампа для отсчета времени срабатывания реле; *4* — электросекундомер; *5* — реостат РП-3 или РП-4 на 800—1000 *ом*, 0,5 *а*; *6* — трансформатор ОСО-0,25; *7* — амперметр со шкалой на 30 *а*; *8* — рубильник, шунтирующий амперметр на 30 *а*; *9* — амперметр со шкалой на 250 *а*, с трансформатором тока 250/5 *а*; *10* — рубильник для шунтирования клемм *11*, на которые подключается нагревательный элемент *Н* теплового реле *ТР*; *12* — контакты для подключения контактов управления теплового реле *К*; *13* — выключатель для шунтирования клемм *12*.

волоки, полосы, а также из электротехнической стали, например, из листов сердечника силового трансформатора радио- или телеприемника. Для тепловых реле типа РТ-1 при защите двигателей с номинальными токами от 1,3 до 1,5 *а*; от 1,7 до 2 *а*; от 2 до 2,5 *а*; от 2,5 до 2,8 *а* нагреватели можно исполнить из нихромовой проволоки диаметром 0,8 *мм* в виде спирали, намотанной на стержень диаметром 5 *мм* и имеющей соответственно 25, 20, 15 и 10 витков. Для реле с широкой биметаллической пластиной нагревательные элементы с целью лучшей теплопередачи к пластине можно выполнять в виде плоского зигзага.

При изготовлении пластинчатых нагревательных элементов из отожженной электротехнической стали толщиной 0,35 *мм* ширина при токе 4—4,5 *а* ориентировочно должна быть 3 *мм;* при 6—6,5 *а* —4 *мм;* при 8—8,5 *а* — 5 *мм;* при 10—11 *а* — 7 *мм;* при 20 *а* — 12 *мм* и т. д.

§ 5. Комплектные устройства управления

На рисунке 166 представлена схема станции управления серии БУ-5120 — 0,1,2,3,4,5-й величин и БУ-5121 — 3, 4 и 5-й величин. Трансформатор тока *ТТ* для включения амперметра предусмотрен только на станциях управления 3, 4 и 5-й величин.

В автоматизированных сложных электроприводах применяются магнитные станции управления, которые монтируются на щитке, расположенном в шкафу. Они со-

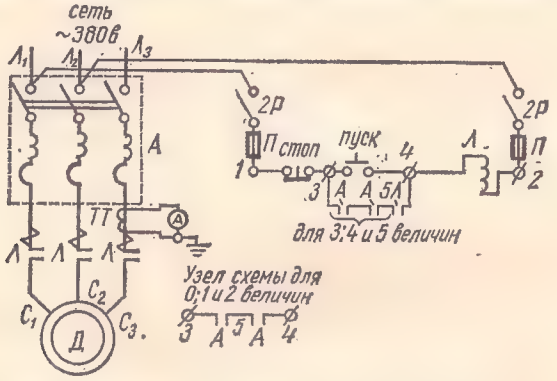


Рис. 166. Схема станции управления БУ-5120.

стоят из сопротивлений, контакторов, реле, предохранителей и других аппаратов, необходимых для надежного управления электроприводом и его защиты. Аппаратурой магнитной станции управляют при помощи командо-контроллера. При вращении вала командо-контроллера в определенном порядке замыкаются и размыкаются контакты в цепях питания катушек контакторов на магнитной станции. Магнитная станция, например, экскаватора типа СЭ-4 (емкость ковша 4 $м^3$) имеет 26 контакторов, 12 предохранителей и большое число различных специальных сопротивлений. Магнитные станции изготавливают стандартными на заводах.

Для управления стационарными электроустановками, а также для включения и отключения участков цепи в распределительных устройствах применяются ящики с пусковыми устройствами, например, Я3100 означает: ящик с автоматом А3100.

Для включения и отключения магистральных и реже групповых осветительных сетей, а также для защиты электрооборудования и сети от токов перегрузки и токов короткого замыкания применяют однофидерные ящики. Ящики типов ЯРВ и ЯРВМ в пылебрызгозащитном исполнении устанавливают как внутри, так и снаружи зданий, с рубильниками и предохранителями или без них. Ящик типа ЯВЗ и ЯВЗБ (с барашковым зажимом), ЯВЗШ (со штепсельным разъемом) защищенного исполнения устанавливают внутри зданий с рубильниками и предохранителями. Ящик типа ЯПВ в защищенном исполнении с уплотнением устанавливают внутри и снаружи зданий с пакетными выключателями и предохранителями.

Для линий и отдельных токоприемников, не требующих частых включений, предназначаются ящики типа ЯБПВ с блоком предохранитель — выключатель (БПВ), выполняемые на номинальные токи 100, 200 и 350 *а*. Для неавтоматического включения и выключения передвижных токоприемников (сварочных трансформаторов, электрических дрелей и т. п.) предназначаются ящики серии ЯВШ. Ящики выпускаются двух- и трехполюсными на токи 25, 60, 100 *а*. Выключатель, встроенный в ящик, пакетный, типа ПВ-2 или ПВ-3, со штепсельным разъемом.

Для управления группой токоприемников предназначены силовые щиты, распределительные пункты, распределительные щиты и т. д.

Щиты типа ЩОБ комплектуют панелями с блоками БПВ и БВ и измерительными приборами. Блок БПВ — коммутационно-защитный (предохранитель типа ПН-2 — выключатель), а блок БВ — коммутационный. В первом блоке для включения и отключения предназначены патроны предохранителей, а во втором — медные ножи.

Распределительные пункты типа ПРБ-59 выполняют с блоками БПВ, с числом отходящих линий от 2 до 6.

Для комплектования распределительных щитов трехфазного тока применяют также типовые панели и щиты ПД и ШД двухстороннего обслуживания и другие, на которых устанавливают рубильники с предохранителями или автоматические выключатели.

Для индивидуальной установки применяют типовые распределительные шкафы серии СП-62, а для пыльных помещений — СПУ-62. Шкафы комплектуют предохранителями серии ПН-2 и рубильником с боковым приводом.

Осветительные щитки выпускают многих типов, их различают по роду защиты от внешней среды, системе осветительной сети, типам устанавливаемой на них защитной и коммутационной аппаратуры, количеству отходящих групп. В качестве аппаратов управления в щитках применяют либо пакетные выключатели, либо автоматы, в качестве защитных аппаратов — пробочные и трубчатые предохранители и автоматы. Последние одновременно используют и для управления цепью. Промышленностью выпускаются щитки типов: А108п, ЩК, ОЩ, ЩОА, С-253, ПР-9000, СУ9400 и др.

Распределительные щиты для сельскохозяйственных производственных помещений можно изготавливать по типовым проектам ВНИПИСельэлектро (типы: Щ-1; Щ-2; ЩВС-03; ЩВ-С3-20; Щ-СФ2-100 и др.).

§ 6. Общие сведения об аппаратуре высокого напряжения. Разъединители. Выключатели нагрузки

К коммутационной аппаратуре высокого напряжения, используемой на электрических станциях и подстанциях, относятся разъединители, выключатели нагрузки, масляные и безмасляные автоматические выключатели.

При помощи разъединителей к сети присоединяют главным образом маломощные установки. При этом вместе с разъединителями используют высоковольтные предохранители, которые защищают установку от коротких замыканий. Разъединители предназначены для присоединения установок к сети или отключения их без напряжения и под напряжением, но при отсутствии нагрузки.

В установках, где размыкаются токи больше 5 *а*, используют выключатели нагрузки, которые предназначены для отключения номинальных токов установок до нескольких сотен ампер (при 6 *кв* до 400 *а*). Для защиты от коротких замыканий ставят предохранители.

Масляные и безмасляные автоматические выключатели применяют для отключения номинальных токов и токов короткого замыкания. Предохранители в этих случаях не используют.

С высоковольтными выключателями последовательно включают разъединители, которые предназначены для отъединения выключателей при их отключенном состоя-

нии. Назначение этих разъединителей — снять напряжение с выключателя для его осмотра или ремонта.

Правилами устройства электротехнических установок допускается применять разъединители для отключения тока холостого хода в тех случаях, когда мощности установок не превышают следующих величин:

при напряжении	до 10 *кв*			320 *ква*
»	»	не ниже	22 *кв*	560 *ква*
»	»	»	35 *кв*	1000 *ква*
»	»	»	110 *кв*	3200 *ква*

Разъединители изготавливают для внутренней или для наружной установки. По числу полюсов они бывают однополюсными и трехполюсными. По способу установки различают разъединители с горизонтальным или вертикальным расположением ножей. Выполняют разъединители с ножами для заземления или без них.

Разъединители для данной установки выбирают по номинальному напряжению, рабочему максимальному току, роду установки (наружная, внутренняя). Выбранные разъединители проверяют на термическую и динамическую устойчивость при коротких замыканиях.

В номенклатурном обозначении разъединителя обычно указываются тип, номинальное напряжение и номинальный ток; например, РВО-10/600 означает: разъединитель внутренний однополюсный, 10 *кв*, 600 *а*; РВЗ-6/600 — разъединитель внутренний трехполюсный, с заземляющими ножами, 6 *кв*, 600 *а*.

Разъединители линейные двухколонковые серии РЛНД предназначены для отключения электрической цепи напряжением до 10 *кв* при отсутствии нагрузочного тока. Применяются в наружных установках. У разъединителя РЛНДА ножи выполнены из алюминиевых пластин. Ножи при отключении и включении поворачиваются в горизонтальной плоскости. Для управления разъединителем используется ручной привод типа ПРН-10.

Выключатель нагрузки отличается от разъединителя наличием пристроенных к отключающим ножам дугогасительных камер.

Выключатели нагрузки типа ВН-16 и ВНП-16 (выключатель нагрузки с пристроенными предохранителями) выпускаются на напряжения 6 и 10 *кв* на рабочие токи 400 и 200 *а*. Предельные токи отключения соответственно равны 20 и 12 *ка*. Выключатели ВН-16 и ВНП-16 предназна-

чены для работы в закрытых помещениях. Выключатель ВНП-17 имеет устройство для отключения электромагнита привода при перегорании плавкой вставки предохранителя. Дугогасительная камера *2* (рис. 167) имеет пластмассовый корпус, внутри которого вставлены вкладыши из органического стекла. Дугогасительный нож *4* входит в щель, образованную вкладышами, и у основания дугогасительной камеры врубается в неподвижные контакты. При отключении между контактами и ножом возникает дуга, под действием которой с поверхности вкладышей выделяется большое количество газов. Давление в камере значительно возрастает, так как выход газам ограничен. При повышении же давления газа его теплопроводность увеличивается и дуга сильно охлаждается и гаснет.

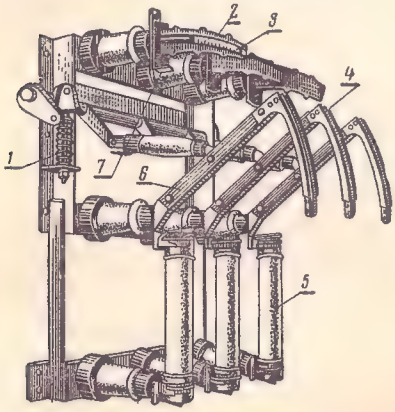


Рис. 167. Выключатель нагрузки ВНП-16:

1 — отключающая пружина; *2* — дугогасительная камера; *3* — вкладыш из органического стекла; *4*—нож дугогасительной системы; *5* — плавкие предохранители; *6*—*7* — рабочие контакты (силовая цепь).

Скорость движения контактов — около 4 *м/сек* — обеспечивается специальными пружинами. Без смены вкладышей выключатели выдерживают от 150 до 200 выключений. Включение и отключение осуществляется ручным рычажным приводом или электромагнитным приводом, когда необходимо дистанционное включение и отключение. Управление выключателями нагрузки осуществляется ручным приводом ПР-16 или ПР-17, дистанционно — приводом ПС-10, ПРА-12 или ПРА-17.

§ 7. Высоковольтные автоматические выключатели и приводы к ним

Масляные многообъемные выключатели с простым разрывом контактов в масле. Многообъемный масляный выключа-

тель представляет собой обычный воздушный выключатель, погруженный в бак с маслом. К таким выключателям относятся выключатели типа ВМ-16 (выключатель масляный, многообъемный) и выключатель ВМБ-10 (баковый), который меньше по весу, чем ВМ-16. Схема устройства многообъемного выключателя представлена на рисунке 168.

Ток фазы проходит через вводы в фарфоровых изоляторах *2* и подвижные контакты *3*, которые во включенном состоянии входят в неподвижные контакты *4*. При включении выключателя пружина *5* сжимается, а при отключении после освобождения удерживающей защелки пружина распрямляется и ускоряет расхождение контактов. Появляющаяся при этом дуга гаснет в масле. Промышленность выпускает в настоящее время только выключатель ВМБ-10 (масляный многообъемный баковый внутренней установки) на номинальное напряжение 10 *кв* и номинальную мощность отключения 100 тыс. *ква*. Амплитудное значение наибольшего тока отключения (ударный ток) 25 *ка*. Пятисекундный ток термической устойчивости 10 *ка*. Масло используется здесь как среда, выделяющая в процессе гашения дуги газ и обладающая высокой дугогасящей способностью. Оно является также охлаждающей средой и изолирует фазы.

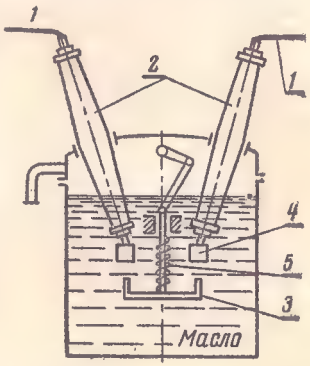


Рис. 168. Многообъемный масляный выключатель:
1 — силовая цепь, *2* — фарфоровые изоляторы; *3* — подвижные контакты; *4* — неподвижные контакты; *5* — отключающая пружина.

Существенный недостаток многообъемных масляных выключателей — их взрывоопасность и возгораемость масла. При образовании дуги выделяется много газов и давление передается стенкам бака. Для предотвращения взрыва принимают ряд мер в соответствии с инструкцией по эксплуатации, требования которой надо тщательно выполнять.

Масляные выключатели с малым объемом масла (горшковые). В малообъемных масляных выключателях масло используется лишь как

средство для гашения дуги и не используется для изоляции фаз друг от друга. Фазы изолированы друг от друга и от земли твердыми изоляторами. В местах разрыва каждой фазы устанавливают масляные горшки. Если фаза имеет два разрыва, устанавливают два масляных бака — горшка — на фазу. Промышленность выпускает малообъемные масляные выключатели типов ВМГ (выключатель масляный горшковый внутренней установки) на 6—10 *кв*, МГГ (масляный горшковый генераторный малообъемный внутренней установки) на 6—10 *кв*.

В горшках имеется система камер, благодаря которым дуга, образующаяся при размыкании, выдувается и быстро гасится (рис. 169). При расхождении силовых кон-

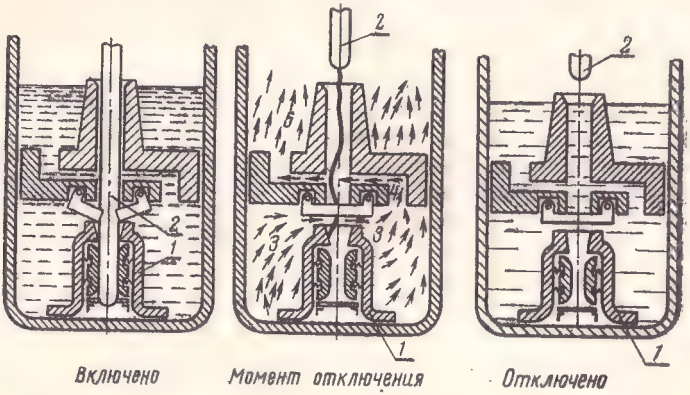


Рис. 169. Схема гашения дуги у выключателя МГГ:
1; *2* — силовые контакты; *3*— полость, где образуется дуга; *4*— канал, через который масло под давлением газов дуги проходит в полость *5*.

тактов *1* и *2* дуга возникает в полости *3*. Под давлением образующихся при этом газов масло из полости *3* под большим давлением выходит в полость *5* и через каналы *4* выдувает образующуюся электрическую дугу. Происходит интенсивная деионизация искрового промежутка. Отключаемая мощность у горшковых выключателей значительно больше, чем у баковых многообъемных.

Трехполюсный малообъемный масляный выключатель типа ВМП-10П со встроенным пружинным приводом предназначен для коммутации под нагрузкой электрических цепей переменного тока с номинальным напряжением

10 *кв* и номинальным током выключателя 600, 1000, 1500 *а*. В выключатель встраивают следующие защитные реле и электромагниты. Реле максимального тока мгновенного действия РТМ со шкалой уставок отключающих токов от 5 до 120 *а*. Реле максимального тока с выдержкой времени РТВ с диапазоном уставок от 5 до 35 *а*. Реле минимального напряжения с выдержкой времени типа РНВ срабатывает при снижении напряжения от 65 до 35%. При напряжении ниже 35% номинального оно действует безотказно. Электромагнит отключения питается от быстронасыщающегося трансформатора тока типа ТКБ-1 или от независимого источника оперативного тока. Электромагниты дистанционного управления включением и выключением действуют мгновенно.

Воздушные выключатели. В воздушных выключателях дуга гасится сжатым воздухом. К ним относятся выключатели ВВ и ВВН наружной установки,

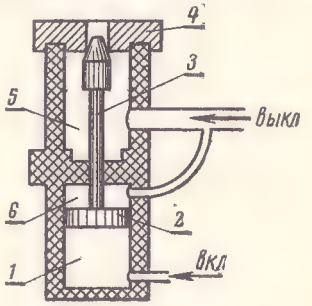


Рис. 170. Принцип действия выключателя с воздушным дутьем:
1— полость, куда подается сжатый воздух при включении *(Вкл)*; *2* — поршень; *3* — подвижный контакт; *4* — неподвижный контакт; *5* — камера, в которой воздух под давлением гасит дугу при размыкании контактов; *6*— полость, куда поступает сжатый воздух для отключения *(Выкл.)*.

напряжением от 10 до 110 *кв*. Принцип работы выключателя, представленного на рисунке 170, заключается в следующем. При включении сжатый воздух подается в камеру *1*, давит на поршень *2* и поднимает подвижный контакт *3* до положения включения с неподвижным контактом *4*. При отключении сжатый воздух подается в камеру *1* сверху и в камеру *5*. Поршень *2* идет вниз, подвижный контакт *3* размыкается с неподвижным контактом *4*, образующаяся при этом дуга выдувается сжатым воздухом из камеры *5*. Такие выключатели устанавливают на каждой фазе.

Автогазовые (газогенерирующие) выключатели. Как и предыдущие, они относятся к безмасляным выключателям. Это выключатели типа ВГ-10 на 6—10 *кв*. Гашение дуги происходит не продуктами разложения масла, а газами, которые выделяются из вкладышей из органического стекла, подобно тому, как это происходит в выключателях нагрузки. Преимущество их — полная взрывобезопасность и пожаробезопасность. Недостаток — выделение газов и копоти, загрязняющих распределительное устройство.

Для включения и отключения высоковольтных выключателей применяются приводы, которые должны обеспечивать надежное включение цепи и отключать выключатель при возникновении аварийных режимов. Для отключения служит специальная катушка, которая включается от реле защиты и вызывает отключение выключателя. Усилие при отключении тратится только на выбивание защелки из запорного механизма, а раздвигают контакты выключателя отключающие пружины.

Приводы к высоковольтным выключателям разделяются по роду расходуемой во время процесса включения энергии на ручные (штурвальные и рычажные) и двигательные. Ручные (ПР, ПРА, ПРАМ, ПРБА) приводы могут быть с автоматическим отключением или без него. Двигательные приводы подразделяются на приводы прямого действия — электромагнитные с дистанционным управлением, потребляющие энергию во время включения непосредственно от вспомогательного источника электроэнергии (приводы ПС, ПЭ, ШПЭ, ШПС), и приводы косвенного действия — пружинные (ППМ-10), грузовые (УГП, ПГ, ПГМ), пневматические (ПВ, ШПВ), выполняющие включение за счет предварительно запасенной энергии. Они могут быть изготовлены для установки внутри помещений, а также на открытом воздухе. В зависимости от конструктивной связи с выключателем приводы могут быть отдельными и встроенными. Они выполняются также допускающими мгновенное автоматическое повторное включение (приводы с АПВ) и не допускающими мгновенного повторного автоматического включения.

Все приводы должны быть снабжены механизмами свободного расцепления. Особый интерес представляют грузовые приводы к высоковольтным выключателям, прос-

тые по конструкции, обеспечивающие автоматическое включение и отключение, а также автоматическое повторное включение выключателей после кратковременных коротких замыканий.

На рисунке 171 представлена одна из схем управления приводом. Схема выполнена с двумя реле тока мгновенного действия *РТМ* и одним реле минимального напряжения *РН*, которое питается от трансформатора напряжения *ТН*. Кнопка *КД* служит для дистанционного отключения. Имеется большое число схем с различными комбинациями реле, воздействующих на расцепители привода.

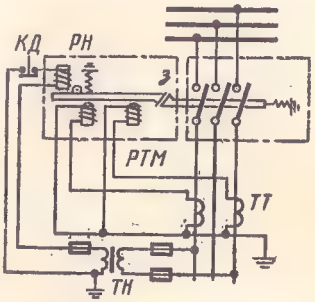


Рис. 171. Схема управления приводом:

ТТ — трансформаторы тока; *ТН* — трансформатор напряжения; *РТМ* — реле максимального тока; *РН* — реле минимального напряжения; *КД* — кнопка дистанционного отключения; *з* — защелка.

Секционирование электрических сетей — одно из средств повышения надежности электроснабжения сельских потребителей. На отдельных отходящих линиях устанавливают автоматические выключатели, которые, например, при коротком замыкании на линии отключают поврежденную линию. Для секционирования линий выпускается сетевой трехполюсный выключатель типа ВМН-10 (для сетей 6—10 *кв*). Выключатель предназначен для установки на опоре линии, а оперируют им с земли при помощи троса. Выключатель типа ВМН-10-30/10 рассчитан на номинальное напряжение 10 *кв* и номинальный ток 30 *а*; номинальная мощность отключения равна 10 *мгва*.

Выключатель снабжен пружинным приводом, который состоит из механизма выключателя с пружиной, механизма расцепителя, механизма АПВ, устройства для ручной заводки пружины и механических указателей положения выключателя и привода. Выключатель работает следующим образом. Оператор с земли заводящим рычагом, укрепленным на опоре и связанным тросом с приводом, заводит пружину включения. Затем рычагом управления воздействуют на удерживающую защелку, которая освобождает пружину. Пружина включает выключатель.

Оператор снова заводит пружину, подготавливая привод к операции АПВ. При возникновении аварийного тока в сети первичное реле тока срабатывает и воздействует при этом на механизм расцепления привода. Выключатель отключается, но механизм АПВ освобождает защелку, которая удерживает пружину привода, и выключатель автоматически включается снова (через 0,3—0,5 *сек* после выключения). Если повреждение на линии устойчивое и аварийный ток восстанавливается, то выключатель снова отключается. Дальнейшее включение осуществляет оператор, так как АПВ однократное. Установку с масляными выключателями ВМН-10 целесообразно защищать от атмосферных перенапряжений разрядниками типа РС-10, устанавливаемыми до и после выключателя на одной и той же опоре.

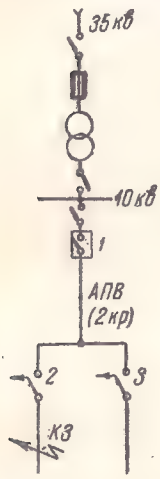


Рис. 172. Схема действия АПВ с отделителями: *1* — выключатель на головном участке линии; *2* и *3* — отделители на ответвлениях; *КЗ* — место короткого замыкания.

Применение АПВ позволяет использовать для секционирования сельских электрических сетей упрощенные секционирующие аппараты — автоматические отделители, выполняемые на базе разъединителей (рис. 172). Отделители *2* и *3* отключают соответствующие участки линии при отсутствии напряжения до АПВ — во время бестоковой паузы, создаваемой выключателем *1* на головном участке линии. На отделителях установлены счетчики операций выключения и токовое реле, а на выключателе *1* головного участка — привод многократного АПВ. При коротком замыкании *КЗ* на одной из отходящих линий отключается выключатель *1* и под действием механизма АПВ снова включается. Если *КЗ* устранилось, линия остается в работе. В момент повторного отключения выключателя *1* (если *КЗ* устойчивое) отделитель *2*, счетчик импульсов которого зафиксировал два импульса тока *КЗ*, отключается, а неповрежденная часть линии остается в работе. Отделитель отключается пружиной, которая заводится при ручном включении отделителя (с земли).

Для создания искусственного короткого замыкания на линии электропередачи (чтобы вызвать отключение

установки) при повреждении в трансформаторе понижающей подстанции предназначаются короткозамыкатели типа КЗ на номинальные напряжения 35—220 *кв*. Короткозамыкатель КЗ-35 выполнен в виде отдельных полюсов, соединяемых при монтаже в один двухполюсный аппарат. При его включении происходит двухфазное короткое замыкание. Привод для короткозамыкателя типа ШПК представляет собой шкаф, в котором помещаются механизм свободного расцепления, два реле максимального тока типа РТМ, электромагнит отключения, блок-контакт типа КСА-6, наборные зажимы с проводкой и подогреватель. С лицевой стороны шкафа выступает конец вала привода, на который надевают съемную рукоятку управления.

§ 8. Общие сведения о выборе аппаратуры управления электроустановками

Для сельскохозяйственных электроустановок до 1000 *в* промышленность пока не выпускает специальной коммутационной и пускорегулирующей аппаратуры. В этих установках применяют аппараты общепромышленного назначения: рубильники, магнитные пускатели, установочные выключатели, плавкие предохранители, пусковые ящики, установочные автоматы, щитовые сборки. Последние три аппарата используют в очень малой степени.

Рубильники, пусковые ящики, установочные выключатели применяют на силовой установке лишь в том случае, когда она работает в присутствии обслуживающего персонала, который должен выключить ее при перегрузке или работе на двух фазах.

Магнитные пускатели применяют на установках автоматизированных или с дистанционным управлением. При этом нужна хорошо налаженная тепловая защита, обеспечивающая выключение установки при перегрузке или работе на двух фазах.

На установках, которые работают в присутствии обслуживающего персонала, но должны иметь нулевую защиту, применяют контакторы или магнитные пускатели без тепловых реле.

На неавтоматизированных установках, работающих без присутствия персонала, устанавливают автоматичес-

кие выключатели типа АП50, которые дешевле магнитных пускателей.

Высоковольтную аппаратуру станций и подстанций выбирают с учетом условий короткого замыкания.

Коротким замыканием (к. з.) в системе называется всякое не предусмотренное нормальным режимом работы замыкание между токоведущими частями, принадлежащими различным фазам системы. Замыканием на землю называется всякое не предусмотренное нормальным режимом системы замыкание на землю токоведущих частей. Различают трехфазные, двухфазные и однофазные короткие замыкания и трехфазные, двухфазные и однофазные замыкания на землю. Двухфазные и трехфазные замыкания на землю могут быть или в одной точке, или в разных точках системы. Причинами возникновения коротких замыканий и замыканий на землю могут быть неправильная эксплуатация электроустановок, износ или повреждение изоляции, перекрытие токоведущих частей птицами или животными и т. д.

В воздушных линиях наиболее часты замыкания на землю, связанные с повреждением изоляторов из-за появления на них грязи, пыли, солей, растрескивания от прохождения волн перенапряжения и т. д. Одна из причин появления микроскопических трещин — старение изоляторов из-за постоянно действующих механических усилий от веса и вибрации проводов, а также недостаточно хорошего их изготовления.

В кабельных линиях наиболее слабым местом с точки зрения к. з. являются кабельные муфты.

Короткие замыкания могут возникать и в распределительных устройствах из-за пробоя изоляции аппаратуры или неправильной эксплуатации.

Большое число повреждений изоляции развивается постепенно и при правильной эксплуатации может быть своевременно обнаружено и устранено. При возникновении коротких замыканий в отдельных элементах электроустановок протекают большие токи. В результате этого токоведущие части значительно нагреваются, и изоляция их разрушается. При очень больших мощностях системы токи короткого замыкания в первый момент (ударный ток к. з.) могут вызвать значительные электродинамические усилия в отдельных элементах оборудования, в результате которых возможны механические разрушения.

Короткие замыкания могут вызвать нарушение устойчивости работы системы, параллельно работающие электростанции могут рассинхронизироваться (выпасть из синхронизма), система распадется, прекратится подача энергии потребителям. Поэтому всякое короткое замыкание, могущее нанести ущерб работе системы, должно быть вовремя отключено. Этой цели служит р е л е й н а я з а щ и т а.

Наибольшую опасность, особенно с точки зрения нарушения работы системы, представляет трехфазное короткое замыкание.

Чтобы правильно выбрать электрическую аппаратуру станций и подстанций, которая могла бы термически и динамически противостоять токам короткого замыкания, чтобы верно оценить схемы электрических соединений станций, выбрать и настроить релейную защиту, в практике проектирования и эксплуатации станций и подстанций проводят расчеты режимов к. з. Расчеты токов короткого замыкания ведут также для выяснения влияния линий электропередачи на провода связи и для анализа устойчивости системы и аварий в системе.

Точные расчеты токов к. з. представляют собой задачу значительной трудности. Величина тока короткого замыкания и характер его изменения определяются значением активных и индуктивных сопротивлений, находящихся в цепи короткого замыкания, параметрами генераторов, питающих точку к. з., характеристиками систем регулирования генераторов, характером нагрузки системы и ее величиной и другими факторами.

Если при коротких замыканиях в линии или на шинах распределительного устройства отключать источник электроснабжения нежелательно, чтобы не лишить электроэнергии других потребителей, применяют р е а к т о р ы для ограничения тока короткого замыкания. Реактор, являющийся в этом случае ограничивающим ток индуктивным сопротивлением, представляет собой катушку без сердечника, индуктивность которой L не зависит от протекающего тока. В зависимости от их размещения (на линии или на шинах установки) различают линейные и шинные реакторы. Ток короткого замыкания вызывает на реакторе большое падение напряжения, и в сторону от реактора до источника электроснабжения поддерживается напряжение, достаточное для работы других потребителей.

Реакторы могут быть сухие или масляные. Сухие предназначены для работы в установках до 35 *кв*, их устанавливают в закрытых распределительных устройствах. Витки реактора в этом случае крепят в бетонных колонках. Опорными изоляторами изолируют фазы друг от друга и от земли. Масляные реакторы предназначены для работы в открытых распределительных устройствах напряжением 35 *кв* и выше.

Глава XVI

Релейная защита сельских станций и подстанций. Предохранители низкого и высокого напряжений

§ 1. Назначение релейной защиты и предъявляемые к ней требования

В результате ненормальных режимов работы электроустановки, например коротких замыканий, больших перегрузок, значительного снижения напряжения и т. д., могут возникнуть повреждения, из-за которых электроустановка выходит из строя. Чтобы избежать повреждений электроустановок при ненормальных режимах, нужно своевременно отключить элементы, в которых возник ненормальный режим, и устранить его причины.

Своевременное отключение поврежденного элемента установки позволяет передавать энергию к потребителям неповрежденных участков без перерыва в электроснабжении. Исключается возможность нарушения работы системы (параллельной работы генераторов и электростанций).

Не во всех случаях, однако, бывает необходимо немедленно отключать электроустановку при возникновении ненормальных режимов. Так, при однофазных замыканиях на землю в системах с малыми токами замыкания на землю нет необходимости выключать электроустановку. В данном случае защита должна обеспечить сигнализацию об однофазном к. з., чтобы обслуживающий персонал принял срочные меры для устранения повреждения и не позволил разрастись ему в более опасное повреждение.

Устройства, предназначенные контролировать нормальную работу электроустановки и давать сигнал о ее неисправности или команду на отключение неисправного элемента, называются **релейной защитой**. Элементы релейной защиты, из которых она выполняется, называют **реле**.

Релейная защита по принципу действия подразделяется на следующие основные типы:

а) токовая защита, которая действует, когда ток в электроустановках превышает определенные заданные величины;

б) дистанционная защита, реагирующая на повреждения с выдержкой времени, увеличивающейся по мере удаления места повреждения от электроустановки;

в) дифференциальная защита, действующая в том случае, когда разность двух или нескольких величин превысит заданную.

К релейной защите предъявляются следующие требования:

а) избирательность действия (селективность), то есть поврежденный элемент должен отключаться ближайшим к нему автоматическим выключателем;

б) высокая чувствительность к повреждениям и ненормальным режимам. Чувствительность оценивается **коэффициентом чувствительности защиты**.

Если защита реагирует на величину тока, то коэффициент чувствительности защиты равен отношению тока металлического к. з. $I_{к.з}$ в конце защищаемой зоны к току срабатывания реле $I_{с.з}$:

$$k_ч = \frac{I_{к.з}}{I_{с.з}}. \qquad (181)$$

Если защита реагирует на величину напряжения, уменьшающегося при аварии, то коэффициент чувствительности равен отношению напряжения срабатывания защиты $U_{с.з}$ к напряжению, которое возникнет при металлическом к. з. в пределах защищаемой зоны $U_{мин}$:

$$k_ч = \frac{U_{с.з}}{U_{мин}}. \qquad (182)$$

Необходимые коэффициенты чувствительности для различных защит приведены в «Правилах устройства

электроустановок». Так, минимальный коэффициент чувствительности для максимальной токовой защиты любых элементов электрической системы равен 1,5. Минимальный коэффициент чувствительности защиты от замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю (с действием на сигнал или отключение) равен 1,25.

§ 2. Принцип действия реле, способы включения и воздействия на выключатель

Реле бывают электрические, реагирующие на изменение электрических величин (ток, напряжение, мощность, частоту), механические, реагирующие на неэлектрические величины (давление газа, скорость течения жидкости, вес и т. д.), температурные, реагирующие на изменение окружающей температуры.

В свою очередь, электрические реле по принципу действия относят к электромагнитным, индукционным, тепловым, электродинамическим и т. д.

Электромагнитные реле получили самое широкое распространение. Они просты в устройстве и надежны в работе. Могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. Собственное время срабатывания — сотые доли секунды. Они могут быть снабжены также механизмом выдержки времени.

По своему устройству они бывают клапанного типа, соленоидного или с поворотным якорем. К реле клапанной конструкции относятся различные промежуточные реле (рис. 173, *а*), например РП-0, МКУ-48 и др.

В нормальном положении клапан реле *1* под действием пружины *2* оттянут от сердечника, и его контакты или разомкнуты *3*, или замкнуты *4*. Если катушка реле питается током, то клапан реле притягивается к сердечнику. При этом замыкающий контакт *3* замыкается, а размыкающий *4* размыкается. Некоторые реле этого типа имеют короткозамкнутый виток *5*, назначение которого — избежать вибраций клапана (и контактов) при переменном токе. В этом витке под действием первичного магнитного потока индуктируется ток витка, который изменяет общий поток части сердечника, охваченной витком, несколько сдвигая его во времени по отношению к основному потоку сердечника реле. Суммарный поток сглаживается, благодаря чему вибрации исключаются.

К реле соленоидной конструкции (рис. 173, *б*) относятся промежуточное реле ЭП-1, реле времени ЭВ и др. В нормальном положении контакты *3* разомкнуты, а контакты *4* замкнуты. При оживлении катушки *6* сердечник *7* втягивается и контакты *3* замыкаются, а контакты *4* размыкаются. Эти реле могут работать как на постоянном, так и на переменном токе.

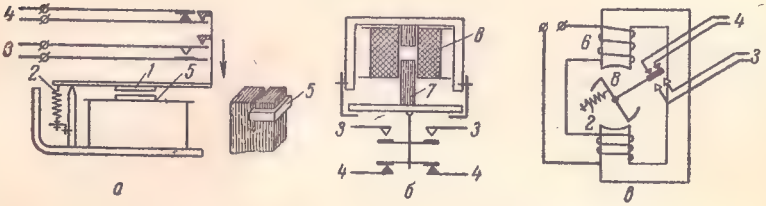


Рис. 173. Схемы конструкций электромагнитных реле:
а — клапанной конструкции; *б* — соленоидной конструкции; *в* — реле с поворотным якорем; *1*— клапан реле; *2*— пружина; *3*— замыкающие контакты; *4*— размыкающие контакты; *5*— короткозамкнутый виток; *6*— катушка реле; *7* — сердечник; *8*— якорь.

К реле с поворотным якорем относятся реле тока типа ЭТ и реле напряжения типа ЭН. В нормальном положении якорь реле *8* под действием пружины *2* занимает несколько наклонное положение. При этом контакты *4* замкнуты, а контакты *3* разомкнуты. Если катушка реле *6* оживлена током, то якорь *8* занимает вертикальное положение. Контакты *4* размыкаются, а контакты *3* замыкаются.

Индукционные реле, такие, как реле максимального тока (ИТ-80), реле направления мощности (ИМБ), реле перегрузки (ИМ), реле разности частот (ИРЧ), реле понижения частоты (ИВЧ), применяются только в цепях переменного тока. Принцип действия реле ИТ показан на рисунке 174. В разрезе магнитной системы *1* вращается алюминиевый диск *14*. Ось диска укреплена в подшипниках на рамке *13*, которая поворачивается на небольшой угол в подшипниках *9*. На полюсы электромагнита насажены витки *11*, которые способствуют созданию вращающего момента диска *14*. В качестве тормоза для исключения самовращения диска используется постоянный магнит *15*.

При обтекании катушки *2* током магнитные усилия в полюсах системы приводят диск *14* во вращение. При пересечении краем диска магнитных силовых линий постоянного магнита *15* в диске появляются местные круговые токи, создающие местные магнитные потоки, которые противодействуют вращению. Поэтому при прекращении тока в катушке реле диск притормаживается. Диск начинает

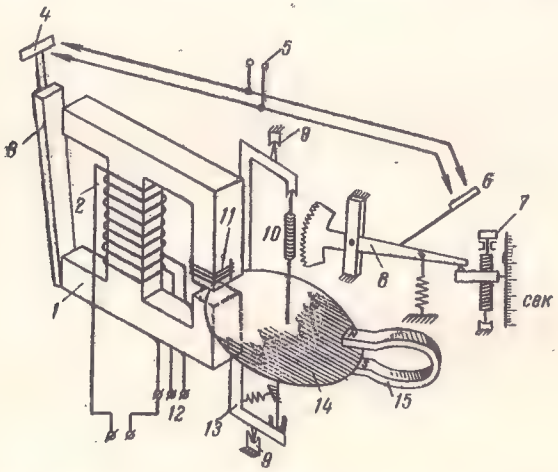


Рис. 174. Схема устройства индукционного реле ИТ-80:

1— магнитная система; *2*— катушка реле; *3*— якорь для мгновенного срабатывания реле при токах короткого замыкания в катушке *12* (токах отсечки); *4* и *6* — контакты в цепи исполнения; *5*— исполнительная цепь; *7*— механизм начальной установки сектора *8* (регулировка выдержки времени); *8*— зубчатый поворотный сектор; *9*— подшипники рамки; *10*— червяк на оси диска; *11*— короткозамкнутые витки; *12* — отпайки от витков катушки (регулировка тока); *13*— стальная поворотная рамка; *14*— алюминиевый диск; *15*— постоянный магнит.

вращаться при достижении током катушки величины, равной 20—40% от тока срабатывания реле. Но при таком токе вращение диска не приводит к срабатыванию контактной системы, состоящей из зубчатого сектора *8* и замыкающей пластинки *6*, так как червяк *10*, сидящий на оси диска, не находится пока в зацеплении с зубчатым сектором *8*. При увеличении тока катушки до величины, заданной путем изменения ступеней *12*, диск начинает вращаться быстрее, вследствие возрастания усилия рамка *13* при-

тягивается к сердечнику *1*. При этом червяк *10* входит в зацепление с зубчатым сегментом, и сегмент начинает поворачиваться, перемещая замыкающую пластину *6*. Время, по истечении которого после появления аварийного тока замкнутся контакты *5*, устанавливается путем изменения относительного расположения сегментов и червяка *10* при помощи устройства регулирования выдержки времени *7*. Сила притяжения рамы к сердечнику возникает не только в результате увеличения скорости вращения диска, а также в результате увеличения притяжения магнитным потоком рассеяния самой стальной рамы.

При увеличении тока, протекающего через катушку, до определенной максимальной величины (тока отсечки) возрастает магнитный поток и к магнитной системе мгновенно притягивается якорь *3*. Пластина *4* замыкает контакты. Релейная защита срабатывает почти мгновенно, собственное время срабатывания реле при этом составляет 0,05—0,1 *сек*. Величину тока мгновенного срабатывания реле (ток отсечки) можно регулировать путем изменения воздушного зазора между якорем *3* и магнитной системой *1*.

Принцип действия индукционных реле мощности подобен принципу действия счетчиков. Основной недостаток индукционных реле — сложность их конструкции.

На рисунке 175 представлена схема включения реле мощности. Одна из катушек включена на напряжение, а другая — на ток. Вращающий момент пропорционален мощности. Если диск будет иметь возможность вращаться только в одну сторону, то такое реле будет реагировать на направление мощности.

Газовые реле (рис. 176) применяются для защиты трансформаторов с масляным охлаждением от внутренних повреждений. Газовое реле представляет собой чугунный резервуар, который помещают между баком трансформатора и его расширителем. В нормальном состоянии резервуар заполнен маслом. Находящиеся в нем поплавки со встроенными в них ртутными прерывателями подняты кверху, а контакты прерывателей разомкнуты. При повреждении внутри трансформатора начинают выделяться газы. Они вытесняют масло из резервуара реле. Верхний поплавок при скоплении газов вверху резервуара опрокидывается, и замыкаются контакты ртутного прерывателя *1*. Ртутный прерыватель включает сигнал о

неисправности трансформатора. Если газы выделяются очень бурно в результате серьезного повреждения, то масло вытесняется из резервуара реле в большем объеме и опрокидывается второй поплавок *2*, отключающий трансформатор. Аналогичное действие реле будет наблюдаться при утечке масла из бака трансформатора.

Газовые реле очень чувствительны. Они могут обнаружить повреждение изоляции в самом начале процесса.

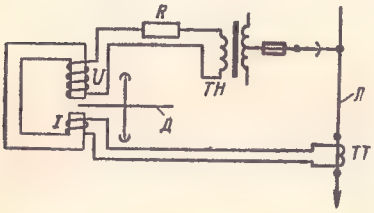


Рис. 175. Схема включения реле мощности:

Л — линия; *ТТ* — трансформатор тока; *ТН* — трансформатор напряжения; *Д* — диск.

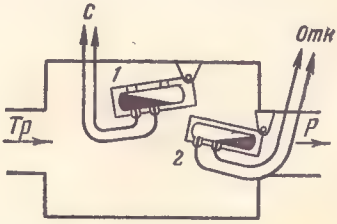


Рис. 176. Принцип действия газового реле:

1— верхний поплавок с ртутным прерывателем; *2*— нижний поплавок с ртутным прерывателем; *Тр* — от трансформатора; *Р* — к расширителю; *С* — на сигнал; *Отк* — на отключение.

Электромагнитные реле по способу включения подразделяют на первичные и вторичные. Катушки первичных реле включают непосредственно в цепь рабочего тока защищаемой цепи (рис. 177). По способу воздействия на цепь отключения реле делятся на реле прямого и реле косвенного действия. Примером первичного реле прямого действия может служить токовый расцепитель воздушного автомата низкого напряжения. Когда ток в первичной цепи превысит установленный уровень, катушка *1* (рис. 177, *а*) подтянет сердечник, который выбьет защелку *2* из зацепления. Рабочие контакты *3* под действием пружины *4* отключат цепь тока.

Реле косвенного действия (рис. 177, *б*) работает следующим образом. При аварийном токе втягивается сердечник *1* реле, замыкаются контакты *5*, оживляется током вспомогательная катушка *6*, сердечник которой выбивает защелку *2* автомата.

Первичные реле прямого действия применяются в установках низкого напряжения малой мощности. Они до-

вольно громоздки, так как катушка реле рассчитана на ток основной силовой цепи, а магнитная система — на отключение выключателя.

Первичные реле максимального тока косвенного действия требуют наличия источника оперативного

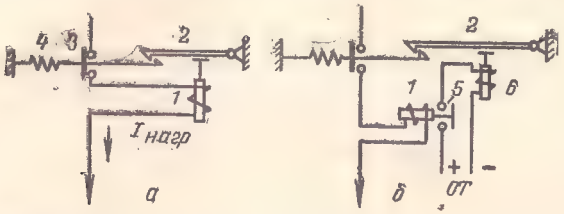


Рис. 177. Схемы включения первичных реле:
а — прямого действия; *б* — косвенного действия; *1* — токовая катушка реле; *2* — защелка; *3* — рабочие контакты; *4* — пружина; *5* — контакты в цепи оперативного тока; *6* — вспомогательная катушка; *ОТ* — оперативный ток.

тока для питания цепей отключения. При проверке реле приходится отключать силовую цепь тока. Эти реле применяются редко.

Вторичное реле *1* максимального тока прямого действия (рис. 178, *а*) получает питание от трансформатора

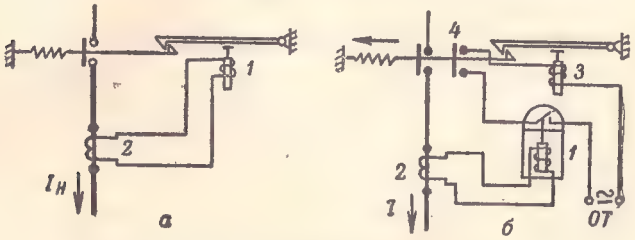


Рис. 178. Схемы включения вторичных реле:
а — прямого действия; *б* — косвенного действия; *1* — реле; *2* — трансформатор тока; *3* — исполнительный электромагнит; *4* — блокировочные контакты; *ОТ* — оперативный ток.

тока *2*. Сердечник реле непосредственно воздействует на механизм отключения автомата. Реле такого типа широко применяются в электрических установках; в частности, они являются неотъемлемой частью автоматических при-

водов (ручных, пружинных, грузовых) к масляным выключателям. Эти реле не нуждаются в наличии источников оперативного тока, а так как они рассчитаны на включение во вторичную цепь трансформатора тока, они компактны в устройстве. Основной их недостаток — необходимость выполнять большую механическую работу, связанную с отключением установки, поэтому точность их работы невелика.

Для выполнения защиты высокой точности и чувствительности применяют вторичные реле косвенного действия (рис. 178, *б*). Реле *1* питается от трансформатора тока *2*. При аварийном токе реле замыкает свои контакты в цепи оперативного тока и катушка исполнительного элемента *3*, оживляясь током, отключает автомат. Блокировочные контакты *4* размыкают цепь оперативного тока после того, как контакты реле *1* уже разомкнут цепь. Поэтому они не подгорают.

В качестве источников постоянного оперативного тока в цепях релейной защиты, от которых питаются отключающие механизмы выключателей, а также катушки вспомогательных промежуточных реле, служат аккумуляторы и выпрямители (твердые), подключаемые к шинам собственных нужд станции или подстанции. Источниками переменного оперативного тока бывают трансформаторы напряжения, тока или трансформаторы собственных нужд.

Преимущество аккумуляторных батарей заключается в том, что их можно использовать в защитах от любых видов аварий. Но они дороги, и применение их оправдывается лишь в крупных установках при одновременном использовании для аварийного освещения, дистанционного управления приводами и т. д.

Оперативный переменный ток от трансформаторов напряжения используют в релейных защитах от повреждений, которые не приводят к значительным понижениям напряжения, в частности от однофазных замыканий на землю. Основной недостаток как трансформаторов напряжения, так и трансформаторов тока, с точки зрения их использования в качестве источников оперативного тока, — это нестабильность напряжения и мощности этих трансформаторов при различных аварийных режимах. Это, в свою очередь, не всегда обеспечивает надежную чувствительность защиты и надежное срабатывание привода.

В качестве источника оперативного тока в схемах релейной защиты от коротких замыканий используют быстронасыщающиеся трансформаторы тока типов ТКБ-1 или ПНТ (промежуточный насыщающийся трансформатор тока). Первичную обмотку этого трансформатора включают в цепь вторичной обмотки измерительных трансформаторов тока схем релейной защиты (рис. 179). Первичная обмотка быстронасыщающегося трансформатора рассчитана на токи до 9,5 *а*. Максимально возможный ток во вторичной обмотке при этом 8 *а*. Нормальным режимом работы этого трансформатора является режим работы с разомкнутой вторичной обмоткой. Если в силовой цепи появится аварийный ток, катушка реле *1* оживится током, замкнет свои контакты и катушка электромагнита отключения *2* окажется включенной в цепь вторичной обмотки быстронасыщающегося трансформатора тока *3*. Сработает расцепитель автомата, силовая цепь обесточится, исчезнет ток во вторичной цепи трансформатора тока *4*. Контакты реле займут свое нормальное положение.

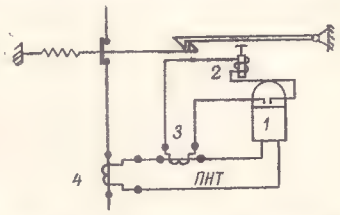


Рис. 179. Включение быстронасыщающегося трансформатора тока:

1 — реле; *2* — исполнительный электромагнит; *3* — быстронасыщающийся трансформатор тока ПНТ; *4* — трансформатор тока силовой цепи.

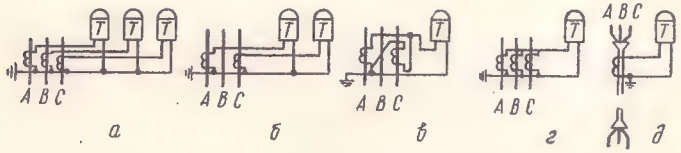


Рис. 180. Схемы соединения трансформаторов тока для питания реле:

а — схема, чувствительная ко всем видам коротких замыканий; *б* и *в* — схемы, не чувствительные к замыканиям на землю фазы *В*; *г* и *д* — схемы, чувствительные к замыканиям на землю.

На рисунке 180 представлены схемы включения трансформаторов тока и реле. На рисунке *а* три трансформатора тока включены по схеме полной звезды. Так же соединены обмотки реле. Эта схема чувствительна в равной мере

ко всем междуфазным коротким замыканиям, а также к замыканиям на землю. Применяется она для всех видов аварийных режимов. Весьма распространена схема *б*, когда два трансформатора тока включены в неполную звезду. Применяется в схемах защиты от трех-, двух- и однофазных замыканий. Понижена чувствительность к некоторым двухфазным замыканиям. Не чувствительна к замыканиям на землю фазы *В*.

В схеме *в* одно реле включено на разность токов в двух фазах. Схема предназначена для защиты от коротких замыканий, как и предыдущая. Низка чувствительность к некоторым двухфазным замыканиям. Не срабатывает при замыкании фазы *В* на землю.

Схемы *г* и *д* используются в защитах от коротких замыканий между фазами (*г*) и на землю (*г* и *д*).

§ 3. Основные параметры и характеристики реле

К параметрам и характеристикам реле относятся: номинальный ток реле, напряжение, потребляемая мощность, мощность исполнительных контактов при размыкании и замыкании, термическая устойчивость, точность шкалы, точность действия, коэффициент возврата, зависимость времени срабатывания от кратности тока и т. д.

1. Токи или напряжения срабатывания реле принимаются по стандартной шкале (для реле тока и напряжения). Для промежуточных реле и реле времени устанавливается номинальное напряжение источника оперативного тока. Это напряжение может быть равно 12, 24, 48, 110, 220, 380 *в* постоянного или переменного тока. Кроме того, для промежуточных реле и реле времени различают напряжение срабатывания реле, обычно равное не менее 60% от номинального значения.

2. Чем меньше потребляемая мощность, тем выше точность работы схемы. Так как токовые реле обычно включаются на питание от трансформаторов тока, а реле напряжения — от трансформаторов напряжения, то в данном случае чем меньше мощность, потребляемая реле, тем точнее работает трансформатор тока или напряжения. Мощность, потребляемая токовыми обмотками реле, находится в пределах 0,1—15 *ва*, а мощность, потребляемая обмотками напряжения,— 1—30 *ва*.

3. Мощность отключения контактов — важный параметр с точки зрения надежности срабатывания схемы. При замыкании или размыкании оперативных цепей контакты в той или иной мере подгорают. Если контакты работают в цепях, токи в которых значительно превышают установленные для данных контактов, то последние могут приварицться друг к другу. Особенно опасны перегрузки контактов при размыкании. Поэтому мощность контактов при отключении, указываемая в каталогах, всегда меньше мощности включения.

4. Термическая устойчивость реле характеризуется током, который может выдержать токовая обмотка реле в течение определенного времени без повреждений. Ток термической устойчивости для 1 *сек* и для длительного периода задается заводом-изготовителем.

5. Точность шкалы — это точность уставки реле. Для реле максимального тока она находится в пределах ±5% от тока трогания реле. Для реле времени точность шкалы не должна быть грубее чем ±0,15 *сек*.

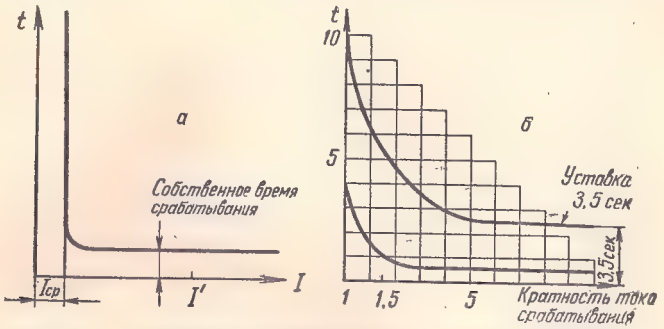


Рис. 181. Зависимости между током в реле и временем его срабатывания:
а — для реле типа ЭТ; *б* — для реле типа ИТ.

Точность действия реле — это погрешность в действии при одной и той же уставке, но в разное время и в разных случаях. Большей частью точность действия зависит от степени загрязнения реле или от механических неисправностей.

6. Коэффициент возврата реле $k_в$ относится к числу важнейших характеристик реле. Он

показывает отношение электрической величины отпускания реле к величине срабатывания реле.

Чем ближе коэффициент возврата к единице, тем точнее защита.

7. Характеристики, выражающие зависимость между током в реле и временем его срабатывания (действия), представлены на рисунке 181.

На рисунке 181, *а* показана характеристика, не зависимая от величины тока (или просто независимая). Как только ток достиг величины $I_{ср}$, реле действует. Будет ли ток равен $I_{ср}$ или значительно больше него, например I', время срабатывания не изменится. Такие характеристики имеют электромагнитные реле типа ЭТ-500.

На рисунке 181, *б* представлена ограниченно зависимая характеристика, относящаяся к реле типа ИТ-81. На некотором участке характеристики (от кратности тока трогания 1,5 до 5) выдержки времени срабатывания находятся в зависимости от величины тока. А дальше, за кратностью 5, выдержка времени уже не зависит от тока (горизонтальная часть характеристики).

§ 4. Релейная защита воздушных электрических сетей и генераторов

Основной вид защиты сельских электрических сетей — это защита от междуфазных замыканий и замыканий на землю. Схемы включения реле для максимальной токовой защиты линий представлены на рисунке 180. Реле максимального тока ЭТ-520 обеспечивает максимальную токовую защиту с независимой выдержкой времени, а реле типа ИТ-80 — защиту с ограниченно зависимой выдержкой времени. Для селективного срабатывания защиты реле максимального тока включают с реле времени.

Принцип действия электромагнитного реле времени показан на рисунке 182. Реле имеет маятниковое устройство *1*. При включении катушки *2* в цепь тока сердечник *3* втягивается в катушку и сектор *4* приводит в действие маятниковый механизм *1* через систему зубчатых передач *5* и *6*. Сектор *4*, поднимаясь кверху, с определенной выдержкой времени вызывает замыкание контактов *8* пластинкой *7*. Выдержку времени реле можно регулировать, меняя взаимное первоначальное положение сектора *4*

и зубчатого колеса *5*, а также изменяя положение грузов *9* на коромысле маятникового устройства. При отключении катушки реле сектор *4* возвращается в первоначальное положение; этой цели служит храповик *10*. Недостаток реле — нарушение точности срабатывания при понижении напряжения в сети.

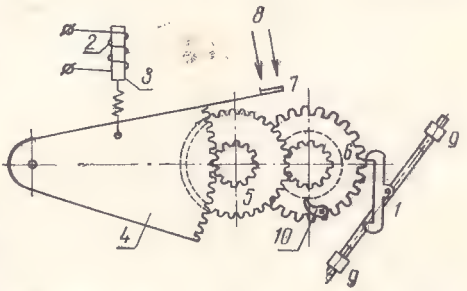


Рис. 182. Принцип действия реле времени:

1— маятниковое устройство; *2*— катушка; *3* — сердечник; *4*, *5*, *6*— передаточный механизм; *7*, *8*— нормально разомкнутые контакты; *9*— грузы для изменения выдержки времени; *10*— храповик.

Селективность срабатывания защиты, таким образом, обеспечивается путем использования электромагнитных реле максимального тока и электромагнитных реле времени. Один из недостатков этого вида защиты — увеличение выдержки времени с приближением к источнику электроснабжения. Величина выдержки времени может оказаться неприемлемой с точки зрения быстроты действия.

Если для защиты линий используются индукционные реле максимального тока, то можно обойтись без реле времени. Поскольку ток к. з. постепенно увеличивается по мере приближения места к. з. к электростанции, выдержка срабатывания реле при этом сокращается. Выдержку последующего реле подбирают таким образом, чтобы обеспечить ступень выдержки между соседними вдоль линии релейными защитами, равную 0,5—0,7 *сек*.

Воздушные и кабельные электрические линии, которые отходят с генераторных шин и не оснащены реакторами, должны быть оборудованы токовыми отсечками (мгновенно действующей защитой) в качестве основной защиты.

Кроме перечисленных выше типов защит, в сетях с несколькими источниками питания или в кольцевых сетях с одним источником питания применяется направленная токовая защита. Направленная токовая защита позволяет отключать поврежденный участок линии с обеих сторон подачи энергии.

Для генераторов до 1250 *ква* должна быть обеспечена защита от многофазных замыканий в обмотке статора, от замыканий на землю в обмотке статора, от токов коротких замыканий вне генератора, от повышения напряжения в обмотке статора гидрогенераторов. Для крупных генераторов — мощностью свыше 1250 *ква* — предусматривается также защита от замыканий между витками одной и той же фазы и защита от замыканий в цепи возбуждения в двух точках. Кроме защиты от различных видов повреждений, предусматривается ряд сигнализационных устройств, которые действуют при нарушении нормального режима работы.

Для ликвидации аварии в самом генераторе недостаточно лишь отключить генератор от сети. Свободный выбег (вращение по инерции) генератора может продолжаться в течение длительного времени (десятки минут). Если при этом сохраняется магнитное поле возбуждения, э. д. с. генератора поддерживается на уровне, вполне достаточном для поддержания электрической дуги в месте повреждения. Поэтому при отключении генераторов в первую очередь должно быть погашено поле возбуждения. Для этой цели релейную защиту генератора дополняют устройством АГП — автоматического гашения поля. Гашение поля необходимо также при сбросе нагрузки в исправном генераторе, так как первичный двигатель может увеличить обороты и э. д. с. вырастет до величины, способной повредить изоляцию обмотки.

В мощных генераторах — более 1250 *ква* — гашение поля обеспечивается введением сопротивлений в обмотку возбуждения генератора и в обмотку возбуждения возбудителя. В генераторах мощностью до 1250 *ква* для автоматического гашения поля рекомендуется лишь вводить сопротивление в цепь обмотки возбуждения генератора величиной в 4—5 раз больше сопротивления самой обмотки возбуждения генератора в горячем состоянии, а в обмотку возбуждения возбудителя — величиной в 10 раз больше сопротивления самой обмотки в горячем состоянии.

На рисунке 183 представлена схема гашения поля с введением гасительных сопротивлений в обмотки возбуждения генератора и возбудителя. Схема действует следующим образом. В нормальном положении контактор *6* удерживается во включенном положении защелкой *14*. Сопротивление *2* гашения поля генератора отключено, а

сопротивление *1* гашения поля возбудителя шунтировано контактами *5*. Лампа *8а* сигнализирует нормальную работу возбуждения. В случае аварии на обмотку реле *16* будет подано питание от релейной защиты. Реле *16* (промежуточное) включит катушку *13* электромагнита защел-

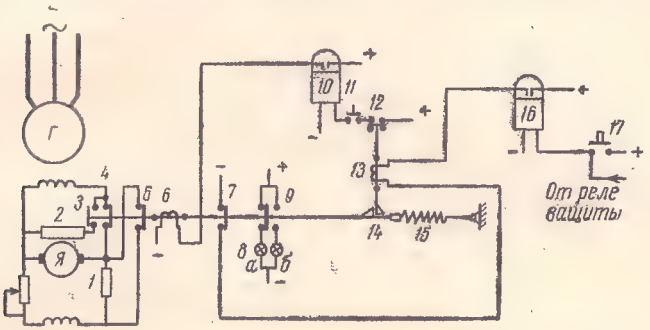


Рис. 183. Схема гашения поля генератора и возбудителя:
1— сопротивление гашения поля возбудителя; *2*— сопротивление гашения поля генератора; *3* — контакты в цепи сопротивления *2*; *4* — контакты в цепи обмотки возбуждения генератора; *5*— контакты, шунтирующие сопротивление *1*; *6*— катушка контактора; *7* — контакты в цепи катушки электромагнита *13*; *8* — сигнальные лампы; *9* — контакты переключения сигнальных ламп; *10*— реле включения контактора; *11* и *12* — контакты в цепи питания реле *10*; *13*— электромагнит защелки; *14*— защелка; *15*— пружина; *16*— промежуточное реле; *17*— кнопка управления автоматическим гашением поля.

ки *14*. Под действием пружины *15* контактор *6* отключится. При этом замкнутся контакты *3*, а затем разомкнутся контакты *4* и контакты *5*. Разомкнутся также контакты *7* в цепи питания катушки электромагнита. Контакт *9* переключит лампу сигнализации *8б*. Если нужно включить автоматическое гашение поля вручную, нажимают кнопку *17*. Контакты *12* электромагнита *13* остаются замкнутыми после обесточивания катушки *13*.

Нормальная работа возбуждения восстанавливается нажатием кнопки *11*. При этом включается реле *10*, контакты которого включают катушку контактора *6*.

На рисунке 184 представлена схема гашения поля (АГП) для гене-

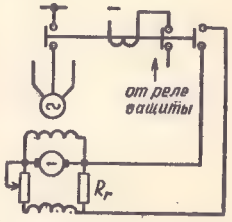


Рис. 184. Схема АГП для генератора до 1000 *квт*.

раторов мощностью 1000 *квт* и менее. При нормальном режиме работы гасительное сопротивление $R_г$ шунтировано блок-контактами автомата. При отключении автомата это сопротивление одновременно с размыканием главных контактов автомата расшунтируется и поле возбуждения возбудителя гасится на нем. Для защиты от междуфазных замыканий внутри генератора мощностью свыше 1250 *ква* применяется продольная дифференциальная защита.

Кроме дифференциальной защиты от внутренних повреждений, должна быть предусмотрена максимальная токовая защита от внешних коротких замыканий.

Генераторы мощностью менее 1000 *квт* имеют максимальную токовую защиту от коротких замыканий и пере-

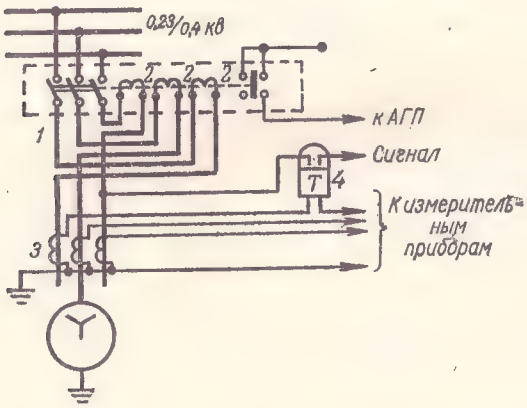


Рис. 185. Защита генераторов до 1000 *квт*, 0,4 *кв* при помощи автомата с максимальными расцепителями:

1— автомат; *2*— максимальные расцепители; *3*— трансформаторы тока для измерительных приборов; *4*— реле контроля за перегрузкой.

грузок. На рисунке 185 представлена схема защиты генератора при помощи автомата с максимальными расцепителями. Автомат *1* снабжен максимальными токовыми расцепителями *2*, катушки которых обтекаются первичным током. Они вызывают отключение автомата при коротких замыканиях. Трансформаторы тока *3* используются для

включения измерительных приборов. Одновременно в цепь одного из трансформаторов тока включено реле *4* контроля за перегрузкой. В случае перегрузки оно включает сигнал.

§ 5. Релейная защита трансформаторов. Защита мощных электродвигателей

По требованиям защиты трансформаторы подразделяются на две категории: трансформаторы до 1000 *ква* и трансформаторы свыше 1000 *ква*. К ненормальным режимам трансформатора относятся: перегрузка и сверхтоки внешних к. з., повышение температуры в отдельных элементах свыше допустимых пределов, а также понижение уровня масла в баке трансформатора. К повреждениям трансформатора относятся: многофазные и однофазные короткие замыкания внутри трансформатора и на его выводах, а также пожар в стали трансформатора.

Один из основных видов защит от повреждений внутри трансформатора — газовая защита. Она срабатывает и от понижения уровня масла в баке. На трансформаторах свыше 1000 *ква* применять газовую защиту обязательно. А для трансформаторов свыше 320 *ква* она обязательна лишь в том случае, если трансформатор устанавливается внутри цехов, мастерских и т. д. Схема включения газовой защиты представлена на рисунке 186. Газовое реле *1* имеет два ртутных контакта (см. § 2 настоящей главы). Верхний контакт, замыкаясь, включает сигнализирующее устройство *2*. Если же повреждение развивается бурно, то замыкается и нижний контакт реле. При этом включается реле сигнализации *3* и через переключатель *4* — промежуточ-

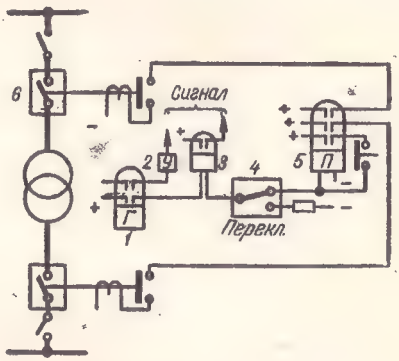


Рис. 186. Схема газовой защиты трансформатора:

1 — газовое реле; *2* — сигнальное реле; *3* — реле звукового сигнала; *4* — переключатель; *5* — промежуточное реле; *6* и *7* — выключатели в силовой цепи.

ное реле *5*, которое вызывает отключение выключателей *6* и *7*.

Мощные трансформаторы — от 7500 *ква* и выше — могут иметь дифференциальную защиту (кроме газовой).

Трансформаторы от 1000 *ква* и выше должны иметь максимальную токовую защиту от сверхтоков, от внешних к. з., а также от замыканий на землю.

Трансформаторы до 1000 *ква* от коротких замыканий защищают плавкими предохранителями.

Электродвигатели напряжением ниже 1000 *в* от междуфазных коротких замыканий защищают плавкими предохранителями или максимальными расцепителями воздушного автомата. Междуфазные замыкания и кратковременные снятия напряжения могут быть также зарегистрированы расцепителем минимального напряжения. Двигатели до 1000 *в* от перегрузок защищают тепловыми реле.

Электродвигатели напряжением выше 1000 *в*, применяемые, в частности, на оросительных системах, должны иметь защиту от перегрузок, от коротких замыканий и от замыканий на землю.

От междуфазных замыканий электродвигатели защищают токовыми реле, например типа ИТ-80 или реле прямого действия, действующими непосредственно на отключение автоматического выключателя. Защиту от замыканий на землю выполняют при помощи реле, включенных в цепь токов замыкания на землю. Защиту от минимального напряжения выполняют при помощи реле минимального напряжения.

§ 6. Предохранители низкого и высокого напряжения

Плавкий предохранитель является простейшим устройством для защиты электроустановок от больших перегрузок и коротких замыканий. Во всех случаях, когда предохранители могут обеспечить необходимую чувствительность защиты и ее избирательность, рекомендуется использовать их вместо автоматических выключателей и реле защиты. На сельских электростанциях предохранители применяют для защиты генераторов мощностью 105 *ква* и менее.

Рекомендуется применять также предохранители для защиты трансформаторов мощностью до 320 *ква* при напряжении до 10 *кв* и мощностью до 1800 *ква* при напряжении до 35 *кв*. В этом случае их применяют совместно с разъединителями или выключателями нагрузки.

Предохранители — одно из основных средств защиты электродвигателей от коротких замыканий.

К основным параметрам предохранителей относятся номинальный ток, номинальное напряжение и предельно отключаемый ток.

Принцип действия предохранителя прост. Его плавкая вставка при протекании по ней тока нагревается. Во время перегрузки или короткого замыкания плавкая вставка перегорает. Цепь тока при этом разрывается. Чтобы при перегорании плавкой вставки не появлялась опасная электрическая дуга, которая может повредить оборудование или представит опасность для обслуживающего персонала, плавкие вставки помещаются, например, в фарфоровых трубках. При перегорании плавкой вставки в трубке давление в ней значительно повышается от нагрева воздуха и появления паров металла, образуется дутье вдоль трубки, и пары газа и металла выдуваются, деионизируясь при этом. Предохранители такого устройства могут разрывать мощность в пределах до 500 *ква* при напряжении до 500 *в*. Однако для большей мощности они непригодны: недостаточно сильное дутье, в результате чего дуга, поддерживаемая очень большим током, не может быть прервана.

Предохранители на бóльшие мощности отключения выпускаются с кварцевым заполнением трубки. Некоторые предохранители выполняются с фибровыми трубками, в которые помещена плавкая вставка. При перегорании плавкой вставки фибровая трубка выделяет газы, давление в трубке значительно увеличивается и дуга деионизируется.

Плавкие вставки предохранителей изготавливают из свинца, его сплавов, цинка, алюминия, меди, серебра. Плавкие вставки из свинца и его сплавов имеют низкую температуру плавления, а также обладают тепловой инерцией ввиду большой удельной теплоемкости этих материалов. Поэтому краткие перегрузки такие плавкие вставки не отключают. Но, с другой стороны, из-за сравни-

тельно высокого удельного сопротивления этих материалов сечение плавких вставок на большие токи получается бо́льшим и при перегорании разбрызгивается большое количество металла. Такие плавкие вставки применяются в установках до 500 *в*.

Плавкие вставки из меди и серебра имеют значительно меньшее сечение, так как обладают хорошей электропроводностью. Температура их плавления также значительно выше. Медные плавкие вставки применяются в низковольтных установках, а серебряные вставки из-за дороговизны — в высоковольтных с малыми токами размыкания.

Применяются также плавкие вставки, работающие по принципу металлургического эффекта. Этот принцип заключается в следующем. Если на медную или серебряную проволоку нанести оловянный шарик, то при нагреве атомы олова будут проникать в материал проволоки, образуя сплав меди и серебра с оловом. Так как температура плавления сплава всегда ниже температуры плавления входящих в сплав металлов, то в месте нахождения шарика плавкая вставка перегорает при температуре, меньшей, чем температура плавления олова.

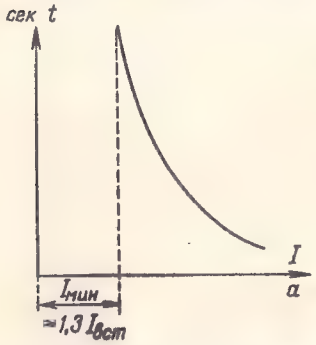


Рис. 187. Ампер-секундная характеристика предохранителя.

Важной характеристикой предохранителя является ампер-секундная характеристика вставки, представляющая собой зависимость времени t перегорания плавкой вставки от протекающего по ней тока I (рис. 187). Как видно из рисунка, время перегорания плавкой вставки быстро уменьшается с увеличением тока. Предохранители выбирают по номинальному току плавкой вставки $I_{вст}$, на который она рассчитана, по номинальному току предохранителя $I_{пр}$, на который рассчитан сам предохранитель, то есть его токоведущие части, и по предельно отключаемому предохранителем току. В предохранитель с определенным номинальным током могут быть встроены плавкие вставки на различные токи.

Низковольтные предохранители должны выдерживать ток $I_{мин}$, равный 130% номинального $I_{вст}$, неопределенно длительное время, а ток в 160% номинального — до 1 часа.

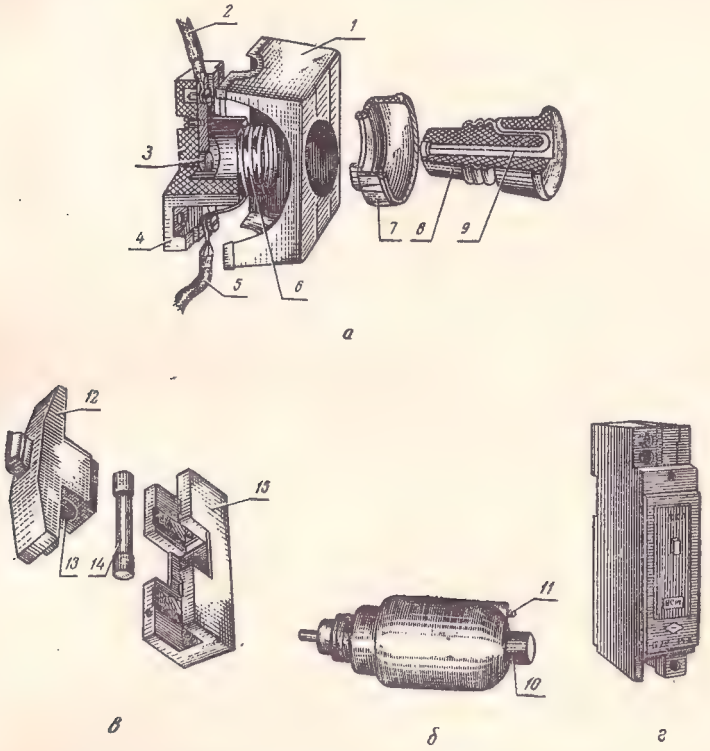


Рис. 188. Предохранители с плавкой вставкой и заменяющие их автоматы:

а — резьбовой предохранитель; *б* — автоматическая пробка; *в* — предохранитель типа ПНТ-10; *г* — бытовой автомат АБ-25; *1* — пластмассовая крышка; *2* и *5* — соответственно провод от сети и провод к нагрузке (через выключатель); *3* — внутренний контакт; *4* — корпус предохранителя; *6* — резьбовой контакт; *7* — крепежное кольцо; *8* — пробка; *9* — плавкая вставка; *10* — кнопка для восстановления цепи; *11* — кнопка для отключения цепи; *12* — крышка предохранителя; *13* — отверстие для трубки; *14* — трубка с плавкой вставкой; *15* — основание предохранителя.

При токах 200—250% время перегорания снижается до нескольких секунд. По своей конструкции низковольтные предохранители могут быть резьбового типа (пробочные) или трубчатые.

Плавкие вставки, калиброванные по току,— строго определенного диаметра из свинцовой или медной проволоки. Предохранители на малые токи типа Ц-14 (диаметр резьбы цоколя 14 *мм*) могут иметь плавкие вставки на 2,5; 4; 6 и 10 *а*; нормальные предохранители Ц-27 (диаметр цоколя 27 *мм*) — на ток 6; 10; 15; 20 *а*; большие — Ц-33 — на токи 10; 15; 20; 30; 40; 60 *а*.

Для нормальных предохранителей, кроме пробок с плавкими вставками (рис. 188, *а*), выпускаются пробочные автоматы (рис. 188, *б*), которые ввертываются в те же основания (вместо пробок). При перегрузке и коротких замыканиях в линии автомат отключает линию своими контактами. Цепь восстанавливается нажатием на кнопку *10*. Кнопка *11* служит для отключения цепи (вместо выключателя).

Резьбовые предохранители типа ПД (с основанием из фарфора) и ПДС (основание из стеатита) предназначаются для установки непосредственно на токоведущие шины распределительных устройств до 380 *в*. Плавкие вставки для них изготавливают по шкале от 1 до 600 *а*.

На рисунке 188, *в* представлен предохранитель типа ППТ-10 с плавкой вставкой ВТФ (вставка трубчатая фарфоровая) на 6 или 10 *а* для установок до 250 *в*. Основание *15* пластмассовое, крепится к несущей конструкции винтом. Внутри трубки *14* (ВТФ) находится сухой кварцевый песок. Трубка *14* устанавливается в отверстии *13* крышки *12* предохранителя.

Трубчатые разборные предохранители ПР-2 выпускают на напряжение до 500 *в* на номинальные токи патронов от 15 до 1000 *а* и на номинальные токи плавких вставок от 6 до 1000 *а*. Патрон *1* (рис. 189) выполнен из фибровой трубки. Плавкая вставка *2* патрона на большие токи выполняется пластинчатой с перешейками. Широкие части плавкой вставки отводят тепло от узких перешейков. При сверхтоках вставка перегорает в узкой части и гашение дуги облегчается. Патроны до 60 *а* имеют цилиндрические контактные части, а на большие токи имеют контактные ножи *3*, которые входят в неподвижные контакты — губки.

Плавкие вставки к низковольтным предохранителям калибруются на токи по стандартной шкале от 6 до 1000 *а*. Предохранители типа ПР изготавливаются без наполнителя. Предохранители с наполнителем НП, НПН (пре-

дохранитель с наполнителем неразборный), НПР (с наполнителем, патрон разборный), ПК (предохранитель с кварцевым наполнителем) выполняются с плавкими вставками от 10 *а* и более на напряжение до 500 *в*. Трубка предохранителей НПН и НПР — фарфоровая, внутри расположено несколько медных проволок диаметром 0,6 *мм*. На каждой из проволок напаивают капельку олова. Кварцевый песок, которым заполнена полость предохранителя, способствует интенсивному охлаждению и деионизации газов, появляющихся при образовании электрической дуги. Предохранители ПН и ПР являются токоограничивающими, поскольку плавкие вставки перегорают ранее, чем ток к. з. успевает достигнуть установившегося значения.

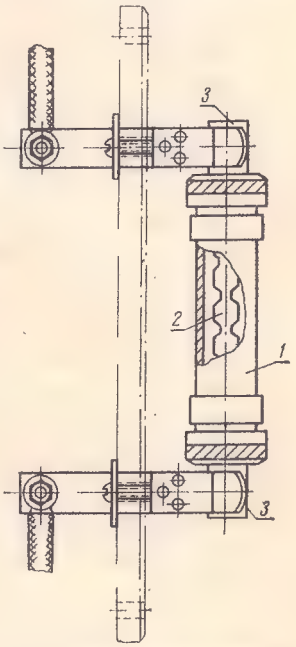


Рис. 189. Предохранитель низкого напряжения типа ПР:

1— патрон из фибровой трубки; *2*— плавкая вставка; *3*— контактные ножи.

Предохранители ПР-2 предназначены в основном для защиты силовых цепей и цепей управления (со шкалой плавких вставок от 15 до 60 *а*); предохранители ПНБ-2— для защиты устройств с полупроводниковыми силовыми вентилями; ППТ-10 — для цепей управления 6 и 10 *а*; ПН-50 — для цепей управления до 5 *а*; ПК-45 — для малогабаритных блоков со слаботочной аппаратурой.

Для защиты цепей высокого напряжения применяют предохранители типов ПК и ПКТ с кварцевым заполнением. Предохранители типа ПК применяют для защиты токовых (силовых) цепей, а предохранители типа ПКТ — для защиты трансформаторов напряжения. Последние предохранители обладают токоограничивающей способностью. Это позволяет применять их без добавочных сопротивлений в цепях трансформаторов напряжения.

В обозначении предохранителей ПК, например ПК-10 н/30, первая цифра указывает номинальное напряжение (10 *кв*), буква «н» — для наружной установки, второе число — 30 — указывает наибольший номинальный ток плавкой вставки, которой может быть снабжен данный предохранитель (до 30 *а*). Если в обозначении нет буквы «н», предохранитель предназначен для внутренней установки.

Предохранители типа ПК обладают разрывной мощностью до 300 *мгва*. Они изготавливаются на напряжение до 35 *кв* и имеют указатель срабатывания. Плавкую вставку предохранителей ПК изготавливают из медной проволоки. Плавкие вставки на малые токи имеют напаянный шарик из олова. Плавкие вставки предохранителей ПКТ изготавливают из константановой проволоки.

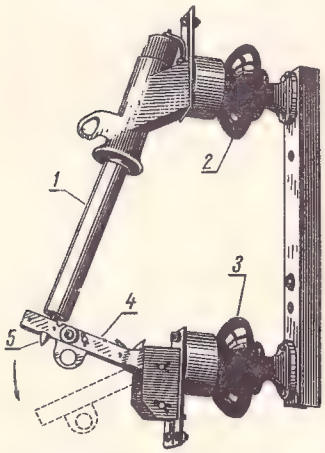


Рис. 190. Предохранитель стреляющего типа ПСН-35:
1 — трубка предохранителя; *2* и *3* — изоляторы; *4* — подвижный нож; *5* — металлический наконечник.

Предохранители стреляющего типа ПСН-35 широко применяются в установках 35 *кв*. Они действуют следующим образом. Трубка *1* (рис. 190) предохранителя устанавливается несколько наклонно на изоляторах *2* и *3*. Нижний изолятор *3* снабжен ножом *4* с пружиной, которая стремится повернуть нож в положение, показанное пунктиром. В нормальном положении нож *4* связан с плавкой вставкой при помощи металлического наконечника *5*. При этом пружина натянута. При перегорании плавкой вставки нож под действием пружины при помощи гибкой проволочной связи вытягивает через наконечник *5* плавкую вставку, которая помещается внутри трубки, ближе к верхнему изолятору *2*. Дуга растягивается вдоль трубки, давление оказывается выше 100 *ат*. Чем больше ток к. з., тем выше давление и тем интенсивнее гаснет дуга. Перегорание предохранителя при этом сопровождается звуком, подобным выстрелу. Предельные мощности отключения предохранителей типа ПСН при 35 *кв* — 550 *мгва*.

Глава XVII

Распределительные устройства и трансформаторные подстанции

§ 1. Общие сведения. Распределительные устройства до 1000 *в*

На каждой электрической станции или подстанции имеется распределительное устройство, назначение которого состоит в том, чтобы принять электрическую энергию от генератора или трансформатора и передать ее потребителям. Приборы и аппараты, установленные в распределительном устройстве, позволяют включать и отключать отдельных потребителей или их группы, учитывать потребляемую ими энергию, измерять мощность, ток, напряжение, частоту и т. д. В распределительных устройствах сосредоточены аппараты защиты от повреждений на отходящих линиях.

Распределительные устройства могут быть закрытого типа, когда все элементы схемы электрических соединений — выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы и другие аппараты и измерительные приборы — расположены внутри помещения и защищены от действия непогоды. Закрытые распределительные устройства целесообразны в том случае, когда аппаратура, например выключатели мощности, выключатели нагрузки, трансформаторы тока и напряжения, приспособлена для работы в закрытых помещениях.

Распределительные устройства открытого типа целесообразны в том случае, когда из-за малой мощности можно обойтись без аппаратуры, предназначенной для закрытых помещений, например для трансформаторных столбовых подстанций 6—10 *кв*, устанавливаемых у потребителя.

Распределительные устройства на напряжение 35 *кв* и выше сооружают, как правило, открытого типа. Измерительные приборы и аппаратуру релейной защиты устанавливают в этом случае в специальных шкафах.

В настоящее время широкое применение на вновь строящихся станциях и подстанциях находят комплектные распределительные устройства, например для трансформаторных подстанций 35/10 *кв*.

В низковольтных распределительных устройствах используют распределительные щиты каркасного типа одностороннего и двухстороннего обслуживания. Высота их равна 2—2,4 *м*. Распределительный щит комплектуется из отдельных панелей — вводных, линейных, секционных и торцовых. Имеется ряд конструкций этих панелей. На рисунке 191 представлены эскиз и схема линейной панели щита типа ЩОБ. Панель состоит из каркаса, на котором смонтированы блоки БПВ (блок предохранитель-выключатель), БВ (блок с ножами вместо выключателей, имеющими двойной разрыв цепи) и измерительные приборы. Каркас по вертикали разбит на пять отсеков. В среднем отсеке размещены сборные шины и приборы, над ним и под ним — блоки, в верхнем — только приборы, а в нижнем — концевые разделки линий. Крышки отсеков выполнены съемными. Это позволяет производить монтаж, ревизию и ремонт с лицевой стороны щита.

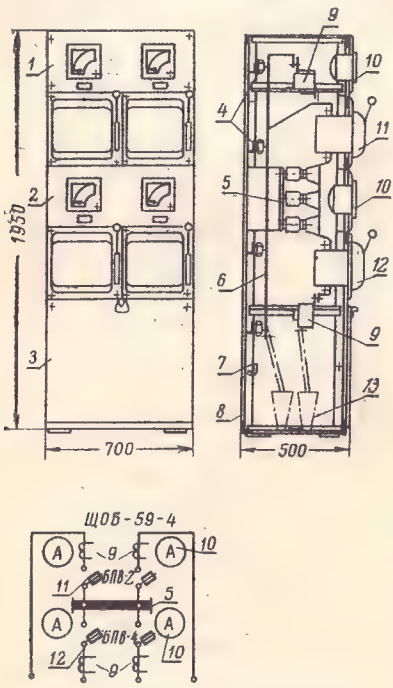


Рис. 191. Эскиз вводной панели ЩОБ-69-3 и схема панели ЩОБ-59-4:

1 — крышка верхнего отсека; *2* — крышка среднего отсека; *3*— крышка нижнего отсека; *4*— изоляторы; *5*— сборные шины; *6*— шинный спуск; *7*— держатель нулевой шины; *8*— каркас; *9*— трансформатор тока; *10*— приборы; *11*— блок БПВ; *12*— блок БПВ-2 или БПВ-4; *13*— отсек для концевых разделок.

Для электростанций малой мощности, от 35 до 150 *ква*, промышленность выпускает щиты управления стандартного типа марки ЩУП. Далее в обозначении щита следует цифра, указывающая мощность генератора, для которого предназначается щит. Такой щит укомплектован всеми необходимыми приборами и аппаратами для управления генератором, контроля его работы и удобного распре-

деления энергии между потребителями. На рисунке 192 представлена схема щита управления типа ЩУП-35Р (35 *ква* с ручным регулированием напряжения). Аналогичную схему имеют щиты ЩУП-60Р (для генератора до 60 *ква*) и ЩУП-125Р (с генератором до 125 *ква*). В последнем добавлен счетчик СА4.

Генератор с возбудителем присоединяют к соответствующим зажимам щита C_1, C_2, C_3 и *Я*, *Ш*, *ЯШ*. Энергия

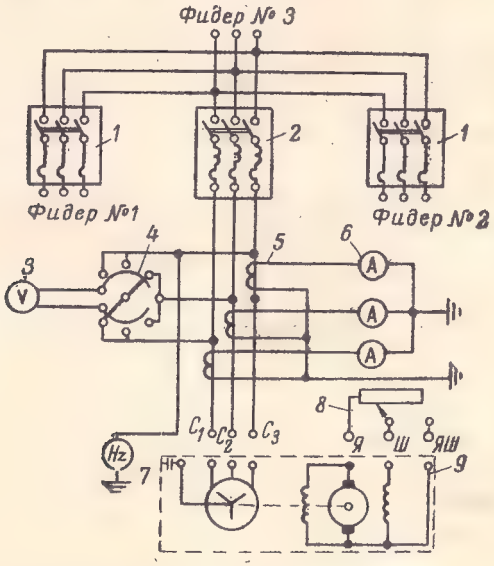


Рис. 192. Схема щита типа ЩУП:

1 и *2*— автоматы; *3*— вольтметр; *4*— переключатель; *5*— трансформаторы тока; *6*— амперметры; *7*— частотомер; *8*— реостат возбуждения; *9*— генератор с возбудителем.

генератора поступает через автомат *2* на фидеры потребителей № 1, 2 и 3. Включаются и выключаются фидеры также автоматами *1*. Автоматы *1* имеют встроенную тепловую защиту от перегрузок. Автомат *2*, кроме того, имеет электромагнитный расцепитель для защиты от коротких замыканий. Напряжение регулируют вручную реостатом *8*, включаемым в цепь обмотки возбуждения возбудителя.

Ток в каждой из фаз контролируют амперметрами *6*, включенными через трансформаторы тока *5*. Напряжение

измеряют между любыми двумя фазами вольтметром *3* с переключателем. Частоту измеряют частотомером *7*. Автоматы генератора и фидеров типа А3100. Для получения фазного напряжения на щите внизу имеются два зажима с условным обозначением земли.

При заказе щита управления обязательно следует указывать тип генератора, его мощность в *ква*, напряжение, число фаз и токи фидеров.

§ 2. Закрытые высоковольтные распределительные устройства 6—10 *кв*

Закрытые распределительные устройства размещают в специально выстроенных для этой цели кирпичных помещениях, разделенных на отсеки или ячейки. В каждой из ячеек размещают оборудование — аппараты и приборы, относящиеся лишь к одной цепи тока.

На рисунке 193 показаны ячейки закрытого распределительного устройства со снятыми панелями.

Распределительное устройство состоит из 5 ячеек. Над ячейками вверху проложены сборные шины *10*. Они укреплены на опорных изоляторах *9*. Каждая из ячеек заполнена элементами, относящимися лишь к одной какой-либо цепи. В первой слева ячейке размещены элементы, относящиеся к подсоединению трансформатора напряжения. В ячейках *I*, *II*, *IV* и *V* размещены разъединители *4*. В ячейке *I* установлены разрядники *3*, предохранители *2* и трансформаторы напряжения *1*.

В ячейке *II*, кроме разъединителя, имеются предохранители *2* и кабельная муфта. Через кабель напряжение подается на отходящую линию. В ячейке *III* установлены выключатель нагрузки *5* и кабельная муфта вывода на воздушную линию. В ячейке *IV* установлены, кроме разъединителя, трансформаторы тока *7*(два), проходной изолятор *8*, масляный выключатель *6* и кабельный вывод на воздушную отходящую линию. В ячейке *V* установлен один разъединитель, через который к сборным шинам присоединяется силовой трансформатор мощностью 560 *ква*, установленный снаружи.

Разъединителями, выключателем нагрузки и масляным выключателем управляют при помощи рычажных приводов, не показанных на рисунке. Распределительное

устройство такого типа характерно для сельской электростанции мощностью до 600 *ква*.

Для удобства монтажа и его удешевления промышленность выпускает комплектные распределительные устройства закрытого типа КРУ. Ячейка комплектного рас-

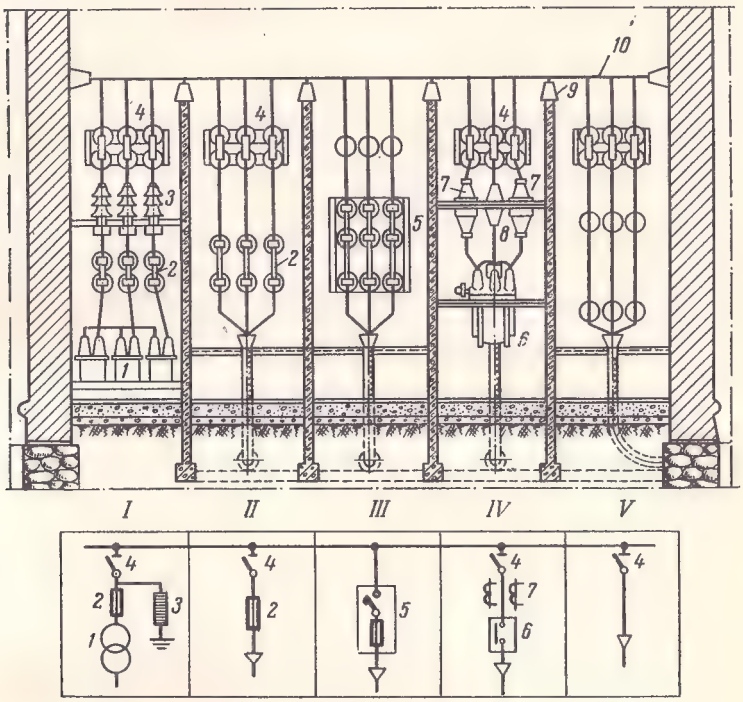


Рис. 193. Закрытое высоковольтное устройство на 6—10 *кв* и его схема:

1 — трансформатор напряжения; *2*— предохранители; *3*— разрядники; *4*— разъединители; *5*— выключатель нагрузки; *6*— масляный выключатель; *7* — трансформаторы тока; *8*— проходной изолятор; *9*— опорные изоляторы; *10* — сборные шины; *I* — ячейка трансформаторов напряжения и разрядников; *II*, *III*, *IV* — ячейки отходящих линий; *V* — ячейка ввода силового трансформатора.

пределительного устройства представляет собой стальной шкаф, в котором устанавливается необходимое оборудование. Все распределительное устройство собирается из отдельных шкафов, соединяемых между собой шинопроводом.

§ 3. Потребительские подстанции 10/0,4 *кв*

Потребительские подстанции 10/0,4 *кв* могут быть закрытого типа, открытые (столбовые) и комплектные.

Закрытые трансформаторные подстанции, или трансформаторные киоски, с трансформатором до 320 *ква* получили применение главным образом в городах и на крупных промышленных предприятиях.

В сельском хозяйстве распространены столбовые трансформаторные подстанции, как наиболее дешевые и простые по устройству. На них можно устанавливать силовые трансформаторы мощностью до 180 *ква*. К высоковольтной линии трансформатор присоединяют при помощи разъединителей и высоковольтных предохранителей.

В новых типовых проектах открытых понижающих трансформаторных подстанций 10/0,4 *кв*, а также в закрытых понижающих подстанциях со стороны низшего напряжения 0,4 *кв* вместо рубильников с предохранителями на отходящих фидерах рекомендуется устанавливать автоматические воздушные выключатели А3100. Освещение включается пакетным выключателем или магнитным пускателем.

Для учета энергии устанавливают счетчики электрической энергии типа СО2 или СА4. Они включаются с трансформаторами тока. Вся низковольтная аппаратура размещается в металлическом шкафу заводского изготовления. Высоковольтным разъединителем управляют приводом с земли. Используют привод съемный или запирающийся на замок. Трансформатор устанавливают на площадке, на которую нужно подняться для того, чтобы сменить предохранители или сделать профилактический осмотр трансформатора. Для подъема на площадку служит раздвижная лестница, которая складывается и запирается. Она должна быть сблокирована с приводом разъединителя таким образом, чтобы разъединитель можно было включить лишь после того, как лестница сложена и заперта.

Вокруг подстанции выполняют контур заземления из уголковой стали или труб. Заземлители соединяют между собой шиной из полосовой или круглой стали, которую приваривают к каждому заземлителю. От заземляющего контура идет провод к нейтрали трансформатора, а также к его кожуху, к металлической раме разъединителя, крюкам и штырям изоляторов. Таким образом за-

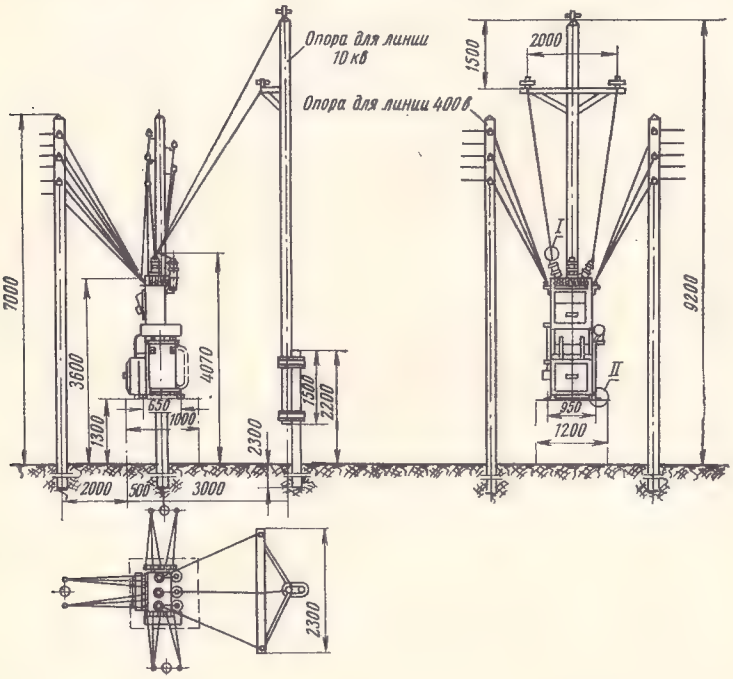
земляют все металлические части, нормально не находящиеся под напряжением, но могущие оказаться под ним вследствие повреждения изоляции в трансформаторе или фарфоровых изоляторах. Вверху, на стороне высокого напряжения, устанавливают разрядники для защиты трансформатора от атмосферных перенапряжений. Подстанцию вместе с контуром заземления ограждают.

Столбовые трансформаторные подстанции с трансформатором до 100 *ква* могут иметь различные конструктивные формы: П-образные, АП-образные и А-образные. Если на подстанции устанавливается трансформатор мощностью 180 *ква* или более, то его обычно монтируют на фундаменте из дерева или камня, а все остальное оборудование монтируют на П- или АП-образных опорах. Территорию такой трансформаторной подстанции требуется ограждать сплошным деревянным забором высотой не менее 2,5 *м*. В заборе устраивают ворота для въезда автомашины и калитку для обслуживающего персонала. Трансформаторы мощностью до 100 *ква* поднимают на площадки с помощью талей, подвешенных на перекладины, где установлен разъединитель. Провода от выводов низшего напряжения трансформатора до щита низшего напряжения и от щита до изоляторов на отходящие линии прокладывают обычно в металлических трубах.

Вместо столбовых трансформаторных подстанций, которые полностью выполняются на месте, значительно дешевле и удобнее применять комплектные трансформаторные подстанции наружной установки типов КТП и КТПА с трансформаторами соответственно типа ТМ и ТМСА, мощностью 30, 60, 100, 160 *ква* с высшим напряжением 6—10 *кв* и низшим — 0,4 *кв* (рис. 194). Напряжение 10 *кв* включается блоком разъединитель-предохранитель *2*. Разрядники *1* предназначены для защиты трансформатора *3* от атмосферных перенапряжений. Напряжение 0,4 *кв* на отходящие линии № 1, 2 и 3 включается автоматами *13*, а на линию уличного освещения — магнитным пускателем *11*. Освещение может включаться от фотореле *16*, которым снабжается цепь управления магнитного пускателя *11*.

Со стороны низшего напряжения силовой трансформатор защищен от коротких замыканий максимальными, а от перегрузок — тепловыми расцепителями установочных автоматов *13* и предохранителями 10 в линии уличного

освещения. Электроэнергию учитывает трехфазный четырехпроводный счетчик *15*, включенный с трансформаторами тока *14*. Контрольная лампа *6* с переключателем *9* служит для проверки напряжения на стороне низшего напряжения. Она же служит для освещения приборов рас-



а

Рис. 194. Комплектная потребительская подстанция КТП (КТПА) с трансформатором до 160 *ква*:

а — примерная установка КТП; *б* — принципиальная схема соединений; *1* — разрядники; *2* — разъединитель; *3* — предохранитель; *4* — трансформатор; *5* — нагреватель; *6* — лампа; *7* — предохранитель пробочный; *8* — розетка; *9* — переключатель; *10* — предохранители; *11* — магнитный пускатель; *12* — переключатель уличного освещения; *13* — установочные автоматы; *14* — трансформаторы тока; *15* — счетчик СА-4; *16* — фотореле.

пределительного шкафа низшего напряжения. Переключатель *9* включает розетку *8* на любое междуфазное напряжение. Включая переносной вольтметр в розетку *8*, можно проверить значения и симметричность напряжений

трансформатора. Нагреватель *5*, включаемый пакетным выключателем, служит для подогрева воздуха внутри распределительного шкафа 0,4 *кв* в зимнее время. В цепи контрольной лампы установлены пробочные предохранители *7*.

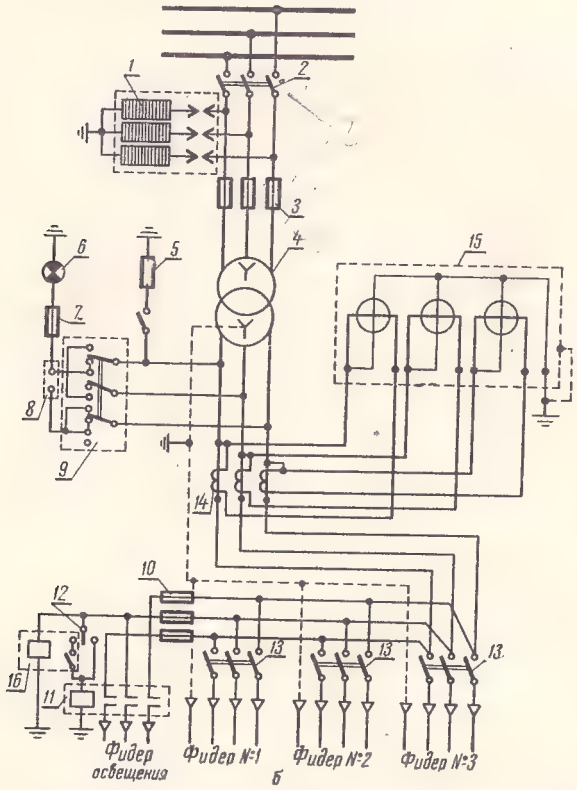


Рис. 194. Комплектная потребительская подстанция КТП (КТПА) с трансформатором до 160 *ква* (продолжение).

Комплектная трансформаторная подстанция КТПН-62 для наружной установки применяется с трансформаторами 180, 320 и 560 *ква*. Высшее напряжение 6—10 *кв*. В новых мачтовых комплектных трансформаторных подстанциях МКТПН 180 *ква*, 10/0,4 *кв* вручную регулируется напряжение под нагрузкой. Подстанции МКТПН

160 *ква*, 35/0,4 *кв* имеют автоматическое регулирование напряжения под нагрузкой в диапазоне —5% — +10% со ступенями по 2,5%.

Комплектные трансформаторные подстанции КТП (180, 320, 560 *ква*, 6/0,4 и 10/0,4 *кв*) комплектуются трансформаторами типа ТСМАФ и распределительными устройствами типа КРН.

Комплектная трансформаторная подстанция КНТП-1000 имеет трансформатор ТМЗ-1000 и распределительное устройство типа ШН-8. Подстанции КТП-320, КТП-560 и КНТП-1000 могут быть с одним или двумя трансформаторами.

Мачтовая комплектная трансформаторная подстанция МКТПН-160/35 имеет трансформатор ТМН-160/35 (сочетание напряжений 35/0,4 *кв*).

К этим подстанциям прилагаются инструкции по установке и вводу в эксплуатацию.

§ 4. Трансформаторные подстанции 35/10 и 35/6 *кв*

Подстанции 35/10 и 35/6 *кв* по своему назначению могут быть или понижающими, или повышающими. В частности, если генераторы на электростанции имеют напряжение 6 *кв*, а значительную мощность от электростанции требуется передать на расстояние нескольких десятков километров, то необходимо иметь повысительную подстанцию с 6 на 35 *кв*.

Понижающие подстанции 35/10 или 35/6 *кв* являются районными понизительными подстанциями. От них электрическая энергия передается на напряжении 10 или 6 *кв* в радиусе до 25 и 15 *км* соответственно. Напряжение 6 *кв* целесообразно принимать тогда, когда часть нагрузки включается в сеть 6 *кв*, например мощные двигатели на насосных станциях, на заводах.

На данных трансформаторных подстанциях распределительное устройство 35 *кв* выполняют открытого типа, а распределительное устройство 6 или 10 *кв* — закрытого.

Эти подстанции выполняют комплектными.

Глава XVIII

Регулирование частоты и напряжения генераторов на сельских электростанциях

§ 1. Общие сведения. Автоматическое регулирование частоты, напряжения и активной мощности

Для нормальной работы потребителей необходимо поддерживать частоту тока и напряжение на номинальном уровне. Снижение частоты ведет к изменению скорости вращения электродвигателей, увеличению потребления мощности, а поэтому к их перегреву. Кроме того, на многих предприятиях изменение скорости вращения рабочей машины может привести к выпуску брака продукции. Частоту регулируют на электрических станциях при помощи регуляторов числа оборотов первичных двигателей. Этот процесс автоматизирован.

Отклонение напряжения от номинальной величины также приводит к нарушению нормального режима работы потребителей. В частности, при снижении напряжения в сети вращающий момент электродвигателя снижается в квадрате от напряжения. Чтобы двигатель продолжал нести нагрузку, должно увеличиться скольжение, то есть снизиться скорость вращения двигателя. Но при ее снижении увеличивается потребляемый электродвигателем ток, что вызывает перегрев электродвигателя. Поэтому на электрических станциях наряду с устройствами регулирования частоты предусматриваются устройства для регулирования напряжения.

В генераторах напряжение регулируется реостатами возбуждения, установленными в цепи обмотки возбуждения возбудителя. Однако все рассмотренные выше схемы генераторов предполагают ручное регулирование напряжения. Но ручное регулирование не может обеспечить надлежащего и своевременного контроля за изменением нагрузки. Автоматическое регулирование, которое при помощи приборов обеспечивает контроль за колебанием нагрузки и изменением возбуждения, обладает большими преимуществами перед ручным регулированием.

В современных синхронных генераторах установлены автоматические устройства, которые не только регулируют напряжение на зажимах генераторов, но и при необходимости увеличивают возбуждение до максимального значения в момент снижения напряжения (например, при аварийных режимах). В отличие от устройств для регулирования напряжения, применявшихся ранее и имевших ограничение тока возбуждения при возникновении коротких замыканий, современные устройства называются поэтому автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ).

Таким образом, в задачи АРВ входит: поддерживать напряжение по заданной характеристике, способствовать повышению устойчивости параллельной работы генераторов при авариях путем увеличения тока возбуждения до максимального, способствовать улучшению работы релейной защиты при коротких замыканиях посредством форсирования возбуждения.

На сельскохозяйственных маломощных станциях устройства АРВ облегчают запуск короткозамкнутых электродвигателей. Эти устройства способствуют более быстрому восстановлению напряжения после отключения поврежденных участков электроустановки. Благодаря этому электрические двигатели, которые в момент аварии и понижения напряжения несколько притормозились, восстанавливают номинальную скорость вращения без нарушения технологического процесса — остановки рабочей машины.

Устройства автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов по принципу действия могут быть подразделены на три группы: 1) автоматические регуляторы напряжения; 2) устройства быстродействующей релейной форсировки возбуждения и 3) устройства компаундирования.

Нагрузка на генератор, определяемая числом и мощностью потребителей электроэнергии, постоянно изменяется. Увеличение нагрузки на генератор вызывает уменьшение скорости вращения первичного двигателя, а следовательно, и частоты. Наоборот, сброс нагрузки вызывает резкое возрастание скорости вращения первичного двигателя. Одновременно увеличивается и частота в сети. Правила технической эксплуатации электротехнических установок предписывают строго поддерживать

частоту на уровне 50 *гц*. Допускаемые отклонения частоты составляют всего лишь $\pm 0{,}5$ *гц*. Правила технической эксплуатации сельских электрических установок предусматривают допустимое отклонение частоты в сельских системах, работающих раздельно от районных промышленных систем, в пределах ± 1 *гц*. Для изолированно работающих станций мощностью до 100 *квт* допустимое отклонение частоты ± 3 *гц*, а для станций до 50 *квт* — ± 5 *гц*.

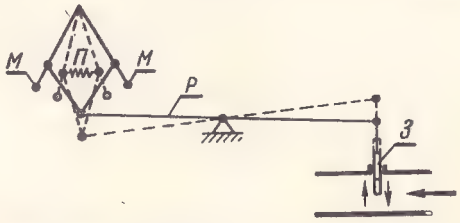


Рис. 195. Принцип работы регулятора угловой скорости прямого действия:
М — центробежный маятник; *Р* — рычаг; *З* — задвижка; *П* — пружина.

Для поддержания частоты на заданном уровне на электрических станциях устанавливают автоматические регуляторы угловой скорости (оборотов) первичных двигателей. Основным элементом регуляторов скорости является центробежный маятник, который воспринимает изменение угловой скорости первичного двигателя и через дополнительные устройства воздействует на орган, регулирующий скорость вращения. Регуляторы угловой скорости могут быть прямого или косвенного действия.

На рисунке 195 представлен принцип работы регулятора прямого действия. При изменении угловой скорости (например, уменьшении) центробежный маятник *М* изменит свою первоначальную амплитуду (радиус) отклонения (показано пунктиром) и через рычаг *Р* воздействует на задвижку *З*, регулирующую поступление горючей смеси в цилиндры двигателя.

Если нужно изменить нагрузку двигателя при неизменной скорости вращения, изменяют натяжение пружины *П*.

Регуляторы прямого действия применяют на двигателях малой мощности. Для поворота регулирующих клапанов в паровых турбинах или поворота лопаток направляющего механизма гидротурбин энергии маятника недостаточно. В этом случае применяют регуляторы косвенного действия. Центробежный маятник воздействует на

промежуточный механизм привода регулирующего органа первичного двигателя, или *серводвигатель*.

§ 2. Автоматические регуляторы напряжения

Для автоматического регулирования напряжения на генераторах сельских электрических станций применяют регуляторы напряжения *реостатного*, *вибрационного* или *комбинированного* типов. Применяют также электронно-ионные регуляторы, которые из-за сложности и дороговизны изготавливают по индивидуальному заказу.

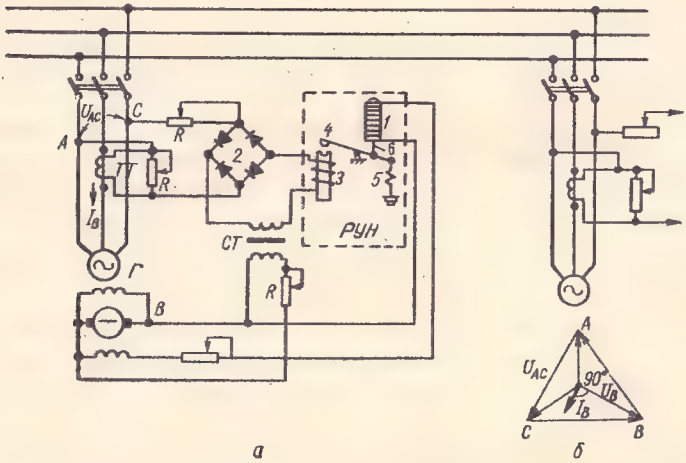


Рис. 196. Схема включения угольного регулятора напряжения (*а*), и векторная диаграмма, поясняющая принцип регулирования реактивной мощности (*б*):

1 — угольный реостат; *2*— селеновый выпрямитель; *3*— электромагнит; *4*— рычаг; *5*— пружина; *6*— тяга; *РУН* — собственно угольный регулятор напряжения; *СТ*— стабилизирующий трансформатор.

Угольный регулятор напряжения — один из самых простых и дешевых регуляторов. Он применяется для генераторов малых мощностей. На крупных электрических станциях он не используется. Это регулятор прямого действия (рис. 196), так как он воздействует не-

посредственно на возбуждение возбудителя. Он состоит из угольного реостата *1*, селенового выпрямителя *2*, электромагнита *3* с рычагом *4* и пружиной *5*. Реостат состоит из угольных столбиков, набранных из отдельных угольных шайб. Сопротивление таких угольных столбиков зависит от степени сжатия шайб. Чем больше давление на столбики, тем меньше сопротивление реостата. При уменьшении давления сопротивление возрастает. Давление на угольные столбики создается тягой *6* и пружиной *5*. Если электромагнит *3* включен, то якорь рычага *4* притягивается к сердечнику электромагнита, пружина *5* натягивается, а тяга *6*, поднимаясь кверху, уменьшает степень сжатия угольных шайб. Таким образом, при повышении напряжения в сети возрастет сила притяжения якоря, а следовательно, уменьшится степень сжатия шайб в угольном реостате, возрастет его сопротивление и снизится ток в цепи возбуждения возбудителя *B*. Напряжение на зажимах генератора *Г* снижается до номинальной величины.

Если нагрузка на генератор возрастает, напряжение его несколько спадает, сила притяжения электромагнита уменьшается, пружина *5* увеличивает сжатие угольных шайб в столбиках реостата и сопротивление реостата уменьшается. Поэтому возрастает ток возбуждения возбудителя, и напряжение на зажимах генератора возрастает до номинальной величины.

При параллельной работе генераторов для повышения устойчивости работы агрегатов в схеме включения угольного реостата возбуждения предусматривается специальное устройство — компенсатор реактивной мощности,— предупреждающее возрастание реактивной нагрузки при изменении возбуждения. Этой цели служит трансформатор тока *ТТ*, включенный в фазу *B*. Вектор напряжения в этой фазе U_B сдвинут на угол 90° по отношению к вектору напряжения U_{AC} между фазами *A* и *C* (рис. 196, *б*). При $\cos\varphi=0$, то есть, если ток будет сдвинут по отношению к напряжению на 90°, во вторичной цепи трансформатора тока *ТТ* появится ток I_B, совпадающий по направлению с напряжением U_{AC}, питающим селеновый выпрямитель, и угольный реостат возбуждения воспримет это увеличение реактивной мощности как увеличение напряжения. Реостат сработает на снижение возбуждения, а следовательно, и снижение реактивной мощности.

Стабилизирующий трансформатор *СТ* предназначен для сглаживания толчков тока и напряжения в момент регулирования напряжения. Этот трансформатор выполняет роль демпфирующего устройства, предотвращающего качания оборотов генератора в период регулирования возбуждения.

Угольный реостат РУН рассчитан на номинальные напряжения 115 и 230 *в*.

Кроме угольного реостата РУН, применяются реостатные регуляторы с проволочным сопротивлением, имеющим отпайки от отдельных секций. Электромагнит регулятора в зависимости от величины напряжения на зажимах генератора вызывает замыкание или размыкание контактов, которые шунтируют отдельные секции проволочного реостата, включенного в обмотку возбуждения возбудителя. Этот реостат рассчитан на ток до 2 *а* и состоит из 10 секций (ступеней) по 3 *ом*. Регулятор реостатного типа применяется для отдельно работающих генераторов мощностью до 60 *ква*. Использовать их при параллельной работе не рекомендуется, поскольку отсутствует устройство для выравнивания реактивных мощностей. При колебаниях нагрузки от нуля до номинальной напряжение генератора поддерживается на уровне $\pm 2{,}5\%$.

Выпускаются также вибрационные регуляторы напряжения АВРН, предназначаемые для генераторов до 60 *ква*. Точность их регулирования $\pm 5\%$ при изменении нагрузки от нуля до номинальной и колебаниях частоты в пределах $\pm 20\%$.

§ 3. Компаундирование возбуждения синхронных генераторов

Компаундирование возбуждения синхронного генератора — это автоматическое регулирование напряжения генератора, основанное на изменении тока возбуждения в зависимости от тока в статоре синхронного генератора.

Принципиальная схема компаундирования представлена на рисунке 197. В силовой цепи генератора *Г* установлены трансформаторы тока *1*. Их вторичные обмотки нагружены на сопротивления *2* и первичную обмотку трансформатора *3*, вторичная обмотка которого питает выпрями-

тель *4*. Подводимое к выпрямителю напряжение можно регулировать реостатами *2*. Выпрямленный ток от выпрямителя подводится к обмотке возбуждения возбудителя *ОВВ* и является тем добавочным током, который приводит к увеличению напряжения на зажимах генератора. Чем больше ток нагрузки генератора, протекающий в его силовой цепи, тем больше выпрямленный ток, дополняющий ток возбуждения возбудителя, и тем больше восстанавливается напряжение на зажимах генератора.

В компаундирующих устройствах отсутствуют подвижные части, контакты, нет зоны нечувствительности. Устройства имеют простую схему, легко настраиваются. Компаундирующее устройство не только улучшает внешнюю характеристику синхронного генератора благодаря увеличению тока возбуждения при росте нагрузки, но и обеспечивает форсировку возбуждения при пуске короткозамкнутых асинхронных электродвигателей соизмеримой с генератором мощности; облегчается запуск двигателя и одновременно улучшается режим напряжения для работавших ранее электродвигателей.

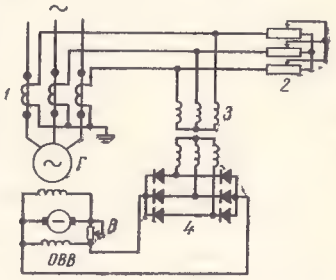


Рис. 197. Схема компаундирования синхронного генератора:
1— трансформаторы тока; *2*— нагрузочные сопротивления; *3* — трансформатор; *4*— выпрямитель.

Компаундирующие устройства по приведенной выше схеме устанавливают на генераторах серии С и СГ мощностью до 60 *ква* при условии, что напряжение возбудителя не более 45 *в*, а ток возбуждения возбудителя не превышает 4,5 *а*. Тип этого устройства УКУ-3М, что означает: универсальное компаундирующее устройство. Вторичный ток трансформатора выпрямителя устройства регулируется в нем, однако, не с помощью реостатов *2*, а путем изменения сечения магнитопровода трансформатора. Для этой цели устройство имеет рукоятку настройки, вращая которую изменяют вторичный ток трансформатора, а следовательно, добиваются необходимой характеристики работы.

Приведенная выше схема имеет ряд недостатков. Наиболее существенный заключается в том, что дополни-

тельный ток в обмотке возбуждения возбудителя пропорционален общему току в силовой цепи генератора, а не его реактивной составляющей. Схема поэтому не может обеспечить надлежащего поддержания напряжения при всех изменениях нагрузки, независимо от ее характера, то есть при малых cos φ, но при тех же токах в статоре (по абсолютной величине) напряжение на зажимах генератора ниже, чем при больших величинах cos φ.

Для устранения недостатков компаундирующего устройства его дополняют специальным устройством, получившим название *корректора напряжения*.

§ 4. Быстродействующая релейная форспровка напряжения возбуждения

Устройства быстродействующей форсировки напряжения закорачивают шунтовой реостат регулирования тока возбуждения возбудителя в моменты глубокого снижения напряжения, например при к. з. Этими устройствами рекомендуется обеспечивать генераторы средней и большой мощности. Генераторы мощностью до 150 *ква*, снабженные компаундирующими устройствами, в устройствах релейной форсировки возбуждения не нуждаются.

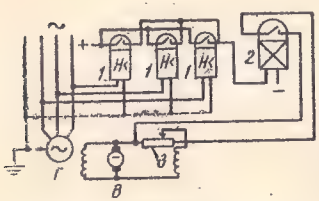


Рис. 198. Схема быстродействующей релейной форсировки возбуждения:
1 — реле минимального напряжения; *2* — промежуточное реле; *3* — реостат возбуждения.

Схема быстродействующей релейной форсировки возбуждения представлена на рисунке 198. Реле минимального напряжения *1* замыкают свои контакты, как только напряжение на зажимах генератора *Г* снизится до 85% от номинального. При этом включаются промежуточное реле *2*, контакты которого шунтируют сопротивление реостата возбуждения *3* в обмотке возбудителя *В*. При восстановлении напряжения сопротивление реостата *3* снова вводится в действие. Эта схема действует при любых к. з. В трехфазных трехпроводных сетях схема может быть выполнена с помощью двух реле, которые будут форсировать возбуждение при двухфазных и трехфазных к. з.

Глава XIX

Заземления в электроустановках. Меры безопасности в электроустановках

§ 1. Общие сведения. Основные характеристики заземлителей и заземляющих контуров

Электрические установки в сельскохозяйственном производстве работают в весьма неблагоприятных условиях; большое число их подвергается воздействию атмосферных осадков, находится в пыльной или влажной среде и т. д. В таких условиях работы возможны частые появления потенциала на корпусах машин, трансформаторов, генераторов и других электрических аппаратов и приборов. Этот потенциал может быть следствием появления влажной и пыльной пленки на изоляторах, появления сконденсировавшейся влаги между обмоткой и корпусом и т. д. Многие из этих замыканий на корпус через пыль и влагу могут пройти затем бесследно, например после начала работы двигателя. Обмотка нагреется, влага

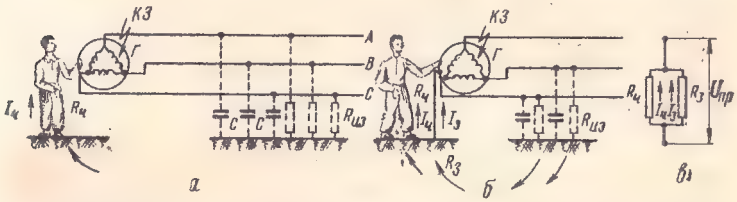


Рис. 199. Прикосновение человека к корпусу электроустановки: *а* — корпус не заземлен; *б* — корпус заземлен; *в* — схема замещения для рисунка *б*; $R_{из}$ — сопротивление изоляции сети; $R_ч$ — сопротивление человека с учетом переходного сопротивления от ног к земле; $R_з$ — сопротивление растеканию заземления; *КЗ* — место замыкания на корпус.

испарится и изоляция восстановится. Но в ряде случаев потенциал, появившийся на корпусе, представляет собой большую опасность для обслуживающего персонала.

На рисунке 199, *а* показано замыкание фазы *А* на корпус в генераторе *Г* электростанции электростригального агрегата. Обмотка генератора соединена в треугольник.

Нуль генератора не заземлен (он не выведен). Сеть электростригального агрегата, выполненная шланговым проводом, имеет сравнительно большую емкостную связь с землей. Но, кроме емкостной связи C с землей, в ряде двигателей (а их общее число 12 и более) может быть неисправна изоляция, например, вследствие сырости ($R_{из}$). Если человек прикоснется к корпусу генератора, изолированному от земли, он окажется включенным в электрическую цепь: фаза A (на корпусе) — тело человека — земля — емкость между землей и фазами B и C и сопротивление изоляции — фаз B и C. Если общее сопротивление этой цепи окажется таким, что ток через тело человека окажется равным или больше 0,05 $а$, то несчастный случай может окончиться смертельным исходом.

Если же корпус генератора $Г$ (трансформатора) заземлен (рис. 199, $б$), то ток поврежденной фазы пойдет в землю по двум параллельным путям: сопротивлению заземления и сопротивлению тела человека. Через тело человека пойдет ток, во столько раз меньший тока через заземление, во сколько раз сопротивление его тела плюс переходное сопротивление ноги — земля ($R_ч$) будет больше сопротивления растеканию заземления $R_з$. В данном примере мы взяли самый тяжелый случай, приняв коэффициент прикосновения, который всегда меньше единицы вследствие экранирования заземлителей, равным единице (рис. 199, $в$):

$$U_{пр} = I_ч R_ч = I_з R_з;\ I_ч = \frac{I_з R_з}{R_ч}.$$

Описанный тип заземлений называется защитным заземлением. Защитное заземление — надежное средство снижения потенциала на корпусах и других металлических нетоковедущих частях до безопасной величины.

Рабочее заземление — это заземление нулевой точки генератора, трансформатора, заземление разрядников и т. д.

Заземлителем называется металлический стержень, провод, лист, полоса или металлический предмет другой формы, соединяющий электрически заземляемую деталь электроустановки с землей. Заземляющий контур состоит из ряда заземлителей, соединенных между собой электрически с помощью металлической полосы или

провода. Основная электрическая характеристика заземлителя или заземляющего контура — это сопротивление растеканию тока.

Ток с заземлителя *3* (рис. 200) растекается во все стороны. Величина тока, проходящего через элементы сферы *I*, *II*, *III*, *IV*,— одинаковая, равная 1. На любых двух соседних точках, взятых в радиальном направлении от заземлителя, ток *I* создает падение напряжения $U=IR$, где R — сопротивление участка сферы между взятыми точками. Чем дальше от заземлителя взяты точки с одинаковым расстоянием между ними (например, шаговым расстоянием), тем меньше напряжение между этими точками.

Представим себе четырех человек, идущих в направлении к заземлителю. Ноги первого человека находятся в точках *1* и *2*, второго — в точках *3* и *4*, третьего — *5* и *6*, четвертого — *7* и *8*.

Длину шага каждого человека примем одинаковой, равной $ш$. Пусть расстояние от первого человека до заземлителя равно r, от второго до заземлителя — $2r$, от третьего — $3r$, от четвертого — $4r$. Найдем и сравним шаговые напряжения на разных расстояниях от заземлителя.

Для любой пары точек — *1* и *2*, *3* и *4* и т. д.— напряжение между ними может быть подсчитано по формуле

$$U_ш = IR_i = I\rho\frac{ш}{S_i}, \qquad (183)$$

где ρ — удельное сопротивление земли;

$ш$ — длина шага (проводника);

S_i — сечение проводника — участка сферы, равное

$$S_i = 2\pi r_i^2.$$

Здесь r_i — расстояние (радиус) от центра сферы, то есть от заземлителя до середины рассматриваемой пары точек.

Подставляя значение S_i в равенство (183), получим:

$$U_ш = I\rho\frac{ш}{2\pi r_i^2}, \qquad (184)$$

то есть шаговое напряжение убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от заземлителя. Если первый человек, находящийся на расстоянии r от заземлителя, име-

ет шаговое напряжение $U_{ш-1}$, то второй человек на расстоянии $2r$ имеет шаговое напряжение $U_{ш-2} = \frac{U_{ш-1}}{4}$; третий на расстоянии $3r$ имеет $U_{ш-3} = \frac{U_{ш-1}}{9}$; четвертый на расстоянии $4r$ имеет $U_{ш-4} = \frac{U_{ш-1}}{16}$.

Если шаговые напряжения представить как разности потенциалов в рассматриваемых точках по отношению к потенциалу удаленной точки земли (от 20 *м* у одиночного заземлителя и далее и от 40 *м* от заземляющего контура и далее), равному нулю, то можно построить график, наглядно показывающий, как убывает потенциал точек земли с удалением от заземлителя, а также можно найти напряжение (как разность потенциалов) между любыми двумя точками на поверхности земли. Этот график построен в верхней части рисунка 200, *а*. Полный потенциал заземлителя по отношению к удаленным точкам земли равен φ вольт. Потенциалы точек *1*, *2*, *3* и т. д. соответственно равны φ_1, φ_2; φ_3 и т. д. И соответственно шаговые напряжения $U_ш$ равны разности потенциалов тех точек, на которых стоят ноги человека.

Напряжением прикосновения называется напряжение между ногами человека, находящегося на земле, и руками, которыми он касается корпуса установки.

На рисунке 200, *б* показаны два случая: один из двигателей $Д_1$ находится непосредственно в зоне заземления, а второй двигатель $Д_2$ находится на некотором расстоянии от заземления (для этого двигателя заземление является выносным).

Напряжение прикосновения в первом случае значительно меньше, чем напряжение прикосновения во втором случае. В первом случае коэффициент прикосновения k, равный отношению $k = \frac{U_{пр}}{U_к} = \frac{U_{пр}}{I_з R_з}$, значительно меньше единицы. А во втором случае этот коэффициент почти равен единице.

Если при устройстве заземления из нескольких заземлителей сопротивление каждого из них, отдельно взятого, равно $R_з$, то общее сопротивление заземляющего контура $R_к$ при числе заземлителей n будет $R_к = \frac{R_з}{n}$ лишь в том

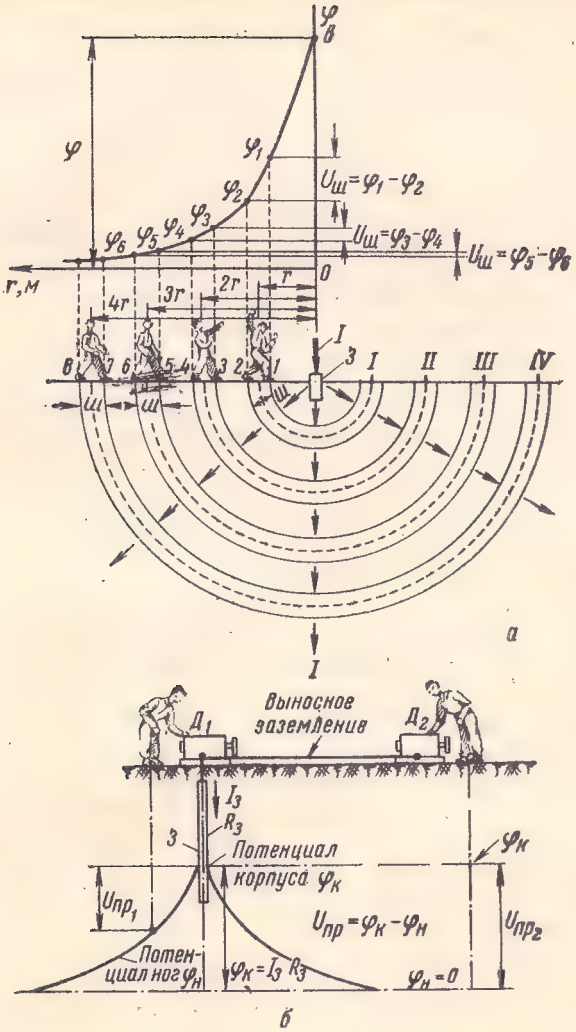


Рис. 200. Растекание тока с заземлителя и характер изменения потенциала вокруг него:

З — заземлитель; $Д_1$ и $Д_2$ — электродвигатели.

случае, когда заземлители находятся на расстоянии не менее 20 *м* друг от друга и их взаимное влияние ничтожно.

Если же заземлители расположены ближе и каждый из них находится в сфере растекания тока с других заземлителей, то на общее сопротивление контура значительное влияние оказывает взаимоэкранирование, которое объясняется взаимодействием токов, растекающихся с заземлителей.

На рисунке 201, *а* показано взаимоэкранирование и распределение потенциалов вокруг контура. Взаимоэкранирование отдельных заземлителей в контуре учитывается коэффициентом использования заземлителей. Этот коэффициент всегда меньше единицы. Он принимается по кривым, построенным по экспериментальным данным (рис. 201, *б* и *в*). Общее сопротивление контура $R_к$ заземлителей при n заземлителях и при условии, что сопротивления каждого из заземлителей равны между собой, составит

$$R_к = \frac{R_з}{\eta n}, \qquad (185)$$

где $R_з$ — сопротивление растеканию отдельного заземлителя;

n — число заземлителей в контуре;

η — коэффициент использования заземлителей, взятый по кривым (рис. 201, *б* и *в*) или таблицам из справочников.

§ 2. Определение сопротивления растеканию заземлителей

В качестве заземлителей применяются стальные трубы диаметром 2″ или угловая сталь $50 \times 50 \times 5$ *мм*. Применяются также стальные полосы толщиной не менее 4 *мм*, поперечным сечением не менее 48 *мм*^{2}.

Сопротивление растеканию заземлителя из трубы определяют по упрощенной формуле

$$R_{тр} = 0{,}9\,\frac{\rho}{l_{тр}}. \qquad (186)$$

Сопротивление заземлителя из угловой стали 50×50 *мм* и длиной 2,5 *м* определяют по приближенной формуле

$$R_{уг} \approx 0{,}00318\rho \ (ом), \qquad (187)$$

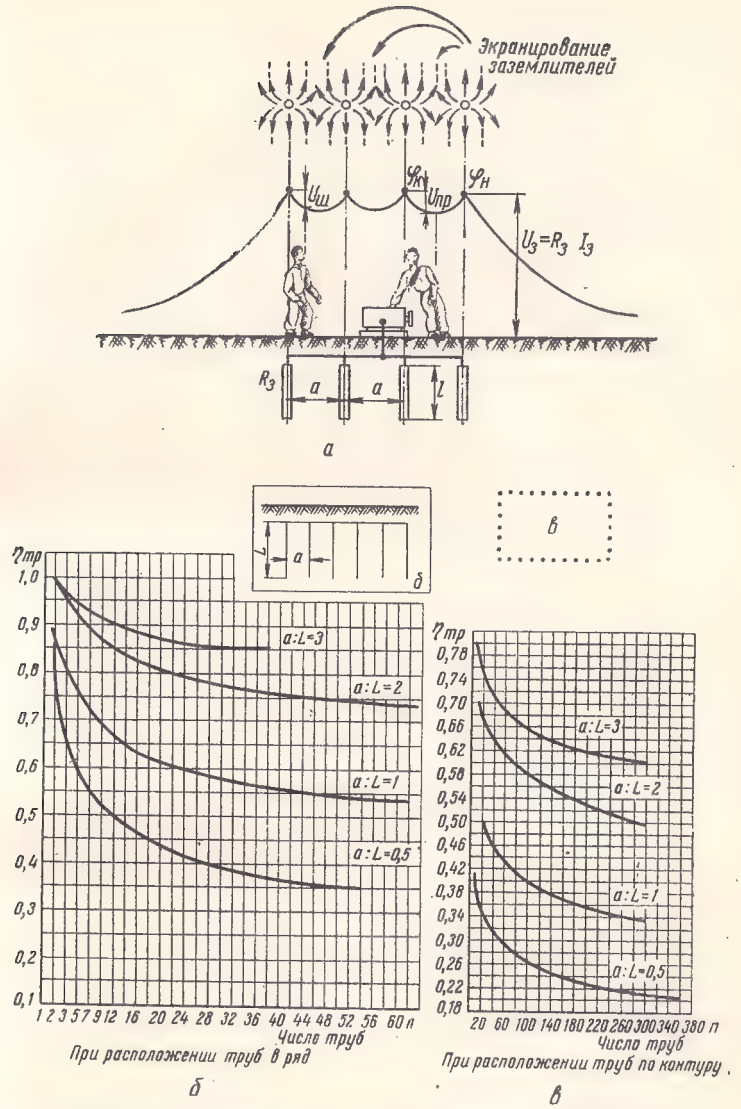


Рис. 201. Взаимоэкранирование и распределение потенциала в заземляющем контуре (*а*) и кривые для определения коэффициента использования заземлителей в контуре при расположении труб (заземлителей из уголковой стали) в ряд (*б*) или по контуру (*в*).

а угловой стали 60×60 *мм*, длиной 2,5 *м* по формуле

$$R_{уг} \approx 0{,}00298\rho \ (ом). \qquad (188)$$

Сопротивление заземлителя из полосы или проволоки

$$R_{п} \approx 0{,}020\frac{\rho}{l} \ (ом), \qquad (189)$$

где l — длина проволоки или полосы (*м*).

Удельные сопротивления грунта изменяются в очень широких пределах в зависимости от типа почвы, ее влажности, времени года и т. д. (табл. 21). Удельное сопротивление грунта можно измерить, если трубчатый заземлитель определенных размеров забить в землю и замерять его сопротивление растеканию, например, измерителем заземлений типа МС-0,7. Затем, решив формулу (186) относительно ρ, можно найти его величину для данного грунта.

Таблица 21

Значения удельного сопротивления различных грунтов

Грунты	Удельное сопротивление ($ом \cdot см \cdot 10^4$)	
	пределы колебаний	рекомендуемое значение для предварительных расчетов
Песок	1—10	7
Супесок	1,5—4	3
Пахотная земля, смешанный грунт (глина, известь, щебень)	—	1
Суглинок	0,4—1,5	1
Глина	0,1—0,7	0,4
Торф	—	0,2

Если удельное сопротивление грунта измерено для данного района, то при расчетах полученное удельное сопротивление должно быть умножено на поправочный коэффициент. Этот коэффициент учитывает изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от времени года, ибо удельное сопротивление в сильной мере колеблется в зависимости от влажности грунта и особенно от степени его промерзания. Эти коэффициенты называются повышающими климатическими коэффициентами (табл. 22).

Таблица 22

Повышающие климатические коэффициенты

Заземлители	Глубина заложения (м)	K_1	K_2	K_3
Поверхностные	0,5	6,5	5,0	4,5
	0,8	3,0	2,0	1,6
Углубленные (трубы, уголковая сталь, стержни)	Верхний конец на глубине около 0,8 *м* от поверхности земли	2,0	1,5	1,4

Если сопротивление измеряли при большой влажности грунта (при большом количестве выпавших осадков), берут коэффициент K_1, если при средней влажности — коэффициент K_2, при сухом грунте — K_3.

Правила устройства электротехнических установок рекомендуют широко использовать естественные заземлители. К естественным заземлителям относятся проложенные в земле водопроводные трубы, обсадные трубы артезианских колодцев (но не трубы с горючими жидкостями или газами), металлические конструкции зданий, соединенные с землей, а также металлические (но не алюминиевые) оболочки кабелей.

В тех случаях, когда естественное заземление имеет сопротивление растеканию $R_{ест}$, большее чем требуемое $R_з$, необходимо добавить искусственное заземление $R_и$. Сопротивление растеканию искусственного дополнительного заземления определяют по формуле

$$R_и = \frac{R_з R_{ест}}{R_{ест} - R_з}. \qquad (190)$$

§ 3. Требования к заземлениям в различных электроустановках

Величины сопротивления растеканию заземлителей тесно связаны с предельно допустимыми напряжениями прикосновения. А напряжение прикосновения, деленное на сопротивление тела человека, дает величину тока через тело человека. При токе 15—20 *ма* человек не может оторваться от токоведущих частей самостоятельно, ток

50 *ма* считается опасным для жизни, а ток 100 *ма* является безусловно смертельным. Исходя из предельно допустимого тока в 50—100 *ма* и возможного минимального сопротивления тела человека в пределах 1000—650 *ом* принято, что максимально допустимая величина напряжения прикосновения в помещениях без повышенной опасности поражения током не должна превышать 65 *в*. В жарких, сырых и тесных помещениях напряжение прикосновения не должно быть выше 36 *в*, а в условиях особо опасных, например при работе в котлах, баках и т. п., это напряжение должно быть 6 — 12 *в*. В зависимости от напряжения электроустановки подразделяются на установки с малым напряжением — до 36 *в* между проводами, установки низкого напряжения — с величиной напряжения между токоведущей частью и землей не выше 250 *в* и установки высокого напряжения, у которых между токоведущей частью и землей напряжение больше 250 *в*. Таким образом, установки 110, 220 и 380/220 *в* с заземленной нейтралью относятся к установкам низкого напряжения. Установки 380/220 *в* с изолированной нейтралью должны быть отнесены к установкам высокого напряжения, так как в случае замыкания на землю одной из фаз в этой системе напряжение других фаз относительно земли будет равно 380 *в*.

В установках высокого напряжения — выше 1000 *в*, присоединенных к сетям, в которых ток замыкания на землю выше 500 *а*, величина сопротивления растеканию защитного заземления должна быть не более 0,5 *ом*. В электрических установках высокого напряжения — выше 1000 *в* — с малыми токами замыкания на землю (менее 500 *а*) сопротивление растеканию заземления должно быть не выше 10 *ом* и удовлетворять равенству

$$I_з R_з \leqslant U_к = 250 \text{ в или } 125 \text{ в}, \qquad (191)$$

здесь $R_з$ — наибольшее значение сопротивления растеканию заземления в течение года;

$U_к$ — принимается здесь равным 250 *в*, если защитное заземление используется только для установки с напряжением выше 1000 *в*, и 125 *в*, если данное заземляющее устройство используется одновременно и для установок до 1000 *в*;

$I_з$ — расчетный ток замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, принимаемый

$$I_з = \frac{U\,(35 l_к + l_в)}{350}, \qquad (192)$$

где U — напряжение высоковольтной сети (*кв*);
$l_к$ и $l_в$ — соответственно длина кабельной и воздушной сетей (*км*).

В электроустановках до 1000 *в* (мачтовые подстанции, сельские электростанции и т. п.) с изолированной или заземленной нейтралью сопротивление растеканию заземляющего устройства не должно быть больше 4 *ом*, если мощность установки (генератора или трансформатора) больше 100 *ква*. Если же мощность генератора или трансформатора до 100 *ква* включительно, то сопротивление растеканию защитного заземления должно быть не более 10 *ом*.

Заземлению подлежат железобетонные и металлические опоры линии 35 *кв*, а также линий от 3 до 20 *кв*, но только в населенных местностях. В электроустановках подлежат заземлению: 1) станины и кожухи электрических машин и трансформаторов, выключателей и других аппаратов; 2) приводы электрических аппаратов; 3) вторичные обмотки измерительных трансформаторов; 4) каркасы распределительных щитов и щитов управления, металлические конструкции открытых распределительных устройств и т. п.

Не подлежат заземлению: 1) арматура подвесных и штыревых изоляторов на деревянных опорах и конструкциях, за исключением крюков и штырей в распределительных сетях низкого напряжения, где заземление предусматривается для защиты от атмосферных перенапряжений (см. ниже); 2) недоступная для прикосновения арматура опорных и проходных изоляторов, установленных на заземленных металлических опорах; 3) рельсовые пути, выходящие за пределы электрических станций и подстанций.

Сопротивление заземления при стекании с него импульсных токов молнии обычно несколько меньше, чем сопротивление при стекании тока промышленной частоты. Но у протяженных заземлителей это импульсное сопротивление может оказаться больше, чем при обычном токе, из-за возрастания индуктивности протяженного заземлителя. Поэтому при устройстве заземлителей для молниеотводов используют заземлители малой протяженности.

§ 4. Особенности устройства заземления распределительных сетей 380/220 *в*

Главной особенностью устройства заземлений электрических приборов и аппаратов, работающих у потребителя, является то, что для каждого отдельного аппарата или прибора заземление не выполняют. Для заземления корпусов, кожухов и всех деталей, нормально изолированных от токоведущих частей, их соединяют с заземленным нулевым проводом. Защитное действие такого заземления сводится к тому, что при металлическом замыкании какой-либо фазы на корпус ток в ней протекает достаточно большой величины, чтобы перегорела плавкая вставка предохранителя в фазном проводе.

На рисунке 202, *а* приведена схема зануления корпуса выключателя (металлического), металлического абажура лампы и корпуса двигателя.

Для надежного срабатывания предохранителя *Пр* при однофазном замыкании должно удовлетворяться следующее условие:

$$I_к = \frac{U_ф}{R_н + R_ф} \geqslant kI_{пл.\ вст} = 3I_{ном.\ вст}, \qquad (193)$$

а при наличии автомата:

$$I_к = \frac{U_ф}{R_н + R_ф} \geqslant kI_{откл.\ авт} = 1{,}5I_{ном}, \qquad (194)$$

где $I_к$ — ток в поврежденной фазе;
$R_н$ — сопротивление нулевого провода;
$R_ф$ — сопротивление фазного провода;
$U_ф$ — фазное напряжение;
$I_{ном.вст}$ — номинальный ток плавкой вставки предохранителя;
$I_{пл.\ вст}$ — ток плавления вставки;
$I_{откл.\ авт}$ — ток срабатывания максимального реле автомата.

Напряжение на корпусе по отношению к земле в этом случае

$$U_{пр} = I_к R_н = \frac{U_ф R_н}{R_н + R_ф}, \qquad (195)$$

где $I_к$ — ток короткого замыкания;
$R_н$ — сопротивление нулевого провода;
$R_ф$ — сопротивление фазного провода.

Если сечение нулевого провода составляет 50% от сечения фазного провода, то есть $R_н = 2R_ф$, то выражение (199) можно переписать следующим образом:

$$U_{пр} = \frac{U_ф R_н}{R_н + \frac{R_н}{2}} = \frac{U_ф \cdot 2}{3}. \qquad (196)$$

Если фазное напряжение равно 220 *в*, то напряжение прикосновения равно $U_{пр} = 147$ *в*.

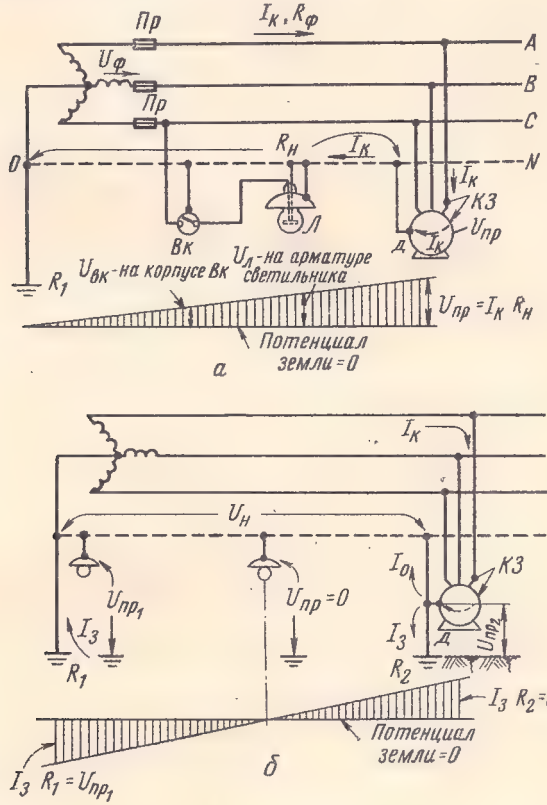


Рис. 202. Схема заземления корпусов выключателя *Вк*, светильника *Л* и двигателя *Д*:

а — в схеме имеется только одно основное заземление R_1; *б* — в схеме имеется основное R_1 и повторное R_2 заземления; $R_н$ — сопротивление нулевого провода; $U_н$ — напряжение на нулевом проводе; $U_{пр}$ — напряжение прикосновения.

При равенстве сопротивлений нулевого и фазного проводов напряжение прикосновения равно 110 *в*.

Для улучшения условий безопасности в электроустановках устраивают повторные заземления (рис. 202, *б*).

В этом случае ток замыкания на корпус будет возвращаться в источник через нулевой провод и через повторное заземление R_2. Ток через землю

$$I_з = \frac{U_н}{R_1 + R_2}, \qquad (197)$$

где $U_н$ — падение напряжения в нулевом проводе.

Напряжение прикосновения или напряжение нейтрали по отношению к земле в начале линии

$$U_{пр\,1} = \frac{U_н R_1}{R_1 + R_2} = I_з R_1. \qquad (198)$$

А напряжение прикосновения у двигателя

$$U_{пр\,2} = \frac{U_н R_2}{R_1 + R_2} = I_з R_2. \qquad (199)$$

Таким образом, если нулевой провод имеет сопротивление, равное сопротивлению фазного провода (тогда $U_н = 110$ *в*), а сопротивления растеканию заземлений равны между собой, то есть

$$R_1 = R_2 = R,$$

то напряжение прикосновения

$$U_{пр\,1} = U_{пр\,2} = \frac{U_н R}{2R} = 55 \text{ в}. \qquad (200)$$

В точке нулевого провода, расположенной в середине между заземлителями, потенциал относительно земли равен нулю.

Согласно «Правилам устройства электроустановок», повторные заземления нулевого провода нужно выполнять на концах воздушных линий, а также на концах ответвлений длиной больше 200 *м* и, кроме того, не менее чем через каждый километр (на линиях и ответвлениях). Каждое повторное заземление должно иметь величину сопротивления растеканию не более 10 *ом*, если линия питается от генератора или трансформатора мощностью больше 100 *ква*, и величину не более 30 *ом*, если мощность генератора или трансформатора не превышает 100 *ква*. Для повторных заземлений нулевого провода следует в

первую очередь использовать естественные заземлители (см. § 2). Заземляющие устройства на линиях, выполненные для защиты от грозовых перенапряжений (см. гл. XXII), допускается использовать для повторного заземления нулевого провода.

§ 5. Классификация помещений по степени опасности поражения людей электрическим током, по условиям окружающей среды и допускаемые напряжения электроустановок

По степени опасности поражения людей электрическим током помещения подразделяются на следующие три категории.

1. Помещения с повышенной опасностью. К этой категории относятся помещения сырые, жаркие, с проводящей пылью и токопроводящими полами (металлическими, земляными, железобетонными и т. п.). К ним относят также такие помещения, в которых человек может одновременно прикоснуться к металлическим конструкциям, имеющим соединение с землей, и к металлическим конструкциям электродвигателей и других электрических аппаратов.

2. Помещения особо опасные. К ним относят помещения особо сырые или с химически активной средой, а также те помещения, которые имеют два или более условий повышенной опасности.

3. Помещения без повышенной опасности. К ним относят помещения, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную опасность и особую опасность.

Согласно «Правилам устройства электроустановок», существует следующая классификация помещений.

1. Сухие помещения, в которых относительная влажность не превышает 60% (жилые помещения, конторы, клубы, некоторые производственные отапливаемые помещения).

2. Влажные помещения, в которых относительная влажность не превышает 75%, пары или конденсирующаяся влага выделяются лишь временно и притом в небольших количествах (неотапливаемые помещения, сени жилых домов, склады, подсобные помещения мастерских и др.).

3. Сырые помещения, в которых относительная влажность длительно превышает 75%.

4. Особо сырые помещения, в которых относительная влажность близка к 100%. Потолок, стены, пол и предметы в помещении покрыты влагой (общественные кухни, бани, прачечные, уборные, помещения для запаривания кормов, овощехранилища, скотные дворы, птичники, теплицы, молокоперерабатывающие предприятия, моечные в мастерских и др.).

5. Жаркие помещения, в которых температура длительно превышает 30°.

6. Пыльные помещения, в которых по условиям производства выделяется технологическая пыль в таком количестве, что она может оседать на проводах, проникать внутрь машин, аппаратов и т. п.

7. Помещения с химически активной средой, в которых по условиям производства постоянно или длительно содержатся пары или образуются отложения, действующие разрушающе на изоляцию и токоведущие части электрооборудования (скотные дворы, конюшни, телятники и т. д.).

8. Взрывоопасные помещения и наружные установки, в которых по условиям технологического процесса могут образоваться взрывоопасные смеси горючих газов или паров с воздухом или другими газами-окислителями, а также горючих пылей и волокон с воздухом (нефтебазы, нефтехранилища и др.).

9. Пожароопасные помещения и наружные установки, в которых хранятся или применяются горючие вещества (мельницы, молотильные сараи, зернохранилища, овины, скотные дворы, конюшни, амбары и др.).

Малое напряжение 12 *в* используется для ручных светильников и электрифицированного ручного инструмента в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных при очень неблагоприятных условиях: теснота, неудобное положение работающего (лежа, сидя, прислонившись к металлическим массам и т. д.), а также постоянное соприкосновение с металлическими заземленными предметами (работа в котле, в силосной башне с остатками силоса и т. д.).

Малое напряжение 36 *в* используют для ручных переносных и стационарных светильников при

расположении их ниже 2,5 *м* над полом и электрифицированного ручного инструмента в помещениях с повышенной опасностью или особо опасных при отсутствии отмеченных выше неблагоприятных условий.

Низкое напряжение до 70 *в* используется в электросварочных агрегатах.

Напряжение 380/220 *в* при заземленной нейтрали рекомендуется использовать для стационарного освещения во всех помещениях, а также для электропривода и других технических целей.

Для каждого из электрических устройств устанавливаются нормы сопротивления изоляции.

Сопротивление изоляции проводов, измеренное в обесточенной установке, должно быть не менее 0,5 *Мом* (между любым из проводов и землей или между проводами). Сопротивление изоляции проводов в помещениях с едкими парами и газами должно быть не менее 0,25 *Мом*. Сопротивление изоляции электрических приборов и аппаратов считают нормальным, если оно равно или больше 1000 $U_н$ *ом*, где $U_н$ — номинальное напряжение, на которое рассчитан данный аппарат или прибор. Однако в ряде случаев, в частности после длительного перерыва в эксплуатации и при неблагоприятных условиях окружающей среды (большая влажность воздуха, сырость), сопротивление изоляции может значительно снизиться, до нескольких тысяч *ом*. В большинстве случаев сконденсировавшаяся в обмотке влага испаряется и изоляция восстанавливается при включении электроустановки в сеть.

Состояние изоляции, то есть ее сопротивление, необходимо проверять перед включением в сеть смонтированной установки и во время эксплуатации. Если установка работает в помещении без повышенной опасности, то проверку изоляции рекомендуется делать не менее одного раза в 2 года, а в помещениях сырых и с едкими парами и газами — не реже одного раза в год.

Необходимо следить за исправностью кожухов на электрических аппаратах, которые защищают токоведущие голые элементы электроустановки от случайного прикосновения обслуживающего персонала (кожухи рубильников, выключателей, переходных коробок и т. д.).

Токоведущие части, которые по условиям работы не могут быть изолированы, но находятся в зоне возможного

прикосновения обслуживающего персонала, например выводы обмоток трансформатора, установленного на полу помещения, задняя сторона электрического щита управления на электростанции и т. д., необходимо ограждать. Стенки ограждения должны находиться на расстоянии не менее 35 *см* от токоведущих частей при напряжении до 380 *в* и на расстоянии 60 *см* — при высоком напряжении (до 35 *кв*). В тех местах, где возможно поражение человека током, нужно вывешивать предупредительные плакаты.

§ 6. Защитное отключение

Защитное отключение предназначается для отключения электроустановки (например, электродвигателя) от сети при появлении опасного потенциала на корпусе. Для защитного отключения используется специальное защитное реле, устройство которого аналогично устройству высокочувствительного реле напряжения с нормально замкнутыми контактами, включаемыми в цепь катушки магнитного пускателя.

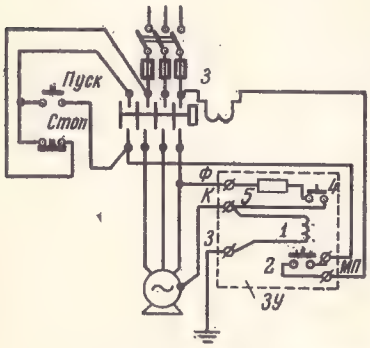


Рис. 203. Схема защитного отключения установки:

1 — катушка реле; *2* — размыкающие контакты; *3*— катушка магнитного пускателя; *4*— кнопка проверки действия защитного устройства; *5*— добавочное сопротивление; *ЗУ* — защитное устройство; *МП* — контакты, включаемые в цепь катушки магнитного пускателя.

На рисунке 203 представлена схема включения защитного устройства *ЗУ* для отключения электродвигателя от сети при появлении потенциала на его корпусе. Катушка реле *1* включена между корпусом двигателя *К* и заземлителем *3*. Нормально замкнутые контакты *2* реле *1* включены в цепь катушки магнитного пускателя *3*. В реле встроены также кнопка *4* и сопротивление *5*. Сопротивление *5* одним концом подключено к фазе сети *Ф*. Кнопка *4* служит для проверки действия защитного реле. При нажатии на эту кнопку катушка реле оказывается включенной на напряжение фазы относительно земли. Защита должна сработать. В условиях эксплуата-

ции при появлении потенциала на корпусе установки реле вызовет отключение магнитного пускателя.

Защитное отключение может применяться в электроустановках 380/220 *в* и при других напряжениях до 1000 *в*. Его можно применять в дополнение к заземлению корпуса электроустановки. Его также можно использовать для отключения передвижных электроустановок, заземление которых практически трудно осуществить.

§ 7. Индивидуальные средства защиты

Индивидуальные средства защиты могут быть разбиты на 3 группы.

1. Средства, предотвращающие случайное прикосновение к частям установки, находящимся под напряжением (временные ограждения, плакаты, предостерегающие надписи; приборы, устанавливающие, что напряжения в установке нет; временные заземления и т. п.).

2. Изолирующие средства, защищающие человека от поражения электрическим током, когда он касается частей электроустановки, находящихся под напряжением (изолирующие перчатки; боты; галоши; подставки и коврики; изоляция инструмента; изолирующие штанги; клещи и др.).

3. Средства, защищающие от действия электрической дуги (защитные очки; брезентовые рукавицы).

По степени надежности индивидуальные изолирующие средства защиты подразделяются на основные и дополнительные. К основным относятся такие средства защиты, изоляция которых выдерживает рабочее напряжение установки, а дополнительные средства усиливают действие основного средства.

В электроустановках с напряжением выше 1000 *в* основными средствами защиты являются штанги и клещи, а дополнительными — диэлектрические перчатки, боты, коврики и изолирующие подставки.

В электроустановках напряжением до 1000 *в* основными средствами защиты являются диэлектрические перчатки и рукавицы, а также монтерский инструмент с изолирующими рукоятками.

При работе на необесточенных электроустановках необходимо одновременно применять соответствующие основные и дополнительные средства защиты.

Штанги и клещи изготавливаются на различное напряжение. При их использовании необходимо строго придерживаться инструкции. Штанги и клещи предназначены для использования во внутренних устройствах. В сырую погоду в наружных установках применяют специальные оперативные штанги, изготовленные в соответствии с особыми техническими требованиями.

Резиновые коврики для использования в электроустановках изготавливают из специальной резины с рифленой поверхностью. Наименьший размер коврика $0{,}75 \times 0{,}75$ *м*. Изготавливаются также дорожки с наименьшей шириной 0,75 *м*.

Изолирующие подставки представляют собой деревянный настил из планок, опирающийся на ножки или фарфоровые изоляторы. Металлические детали даже для соединения деревянных планок использовать нельзя. Наименьшие размеры подставок $0{,}75 \times 0{,}75$ *м*. Расстояние между планками — не более 2,5 *см*. Высота изоляторов — не менее 10 *см*.

Указатель напряжения предназначается для проверки напряжения в устройствах до 10 *кв*. Указатель на 10 *кв* имеет общую длину 680 *мм*, наименьшая длина по изоляции от токоведущей части до обхвата — 320 *мм*.

Переносное временное заземление выполняют из медных проводов сечением не менее 25 *мм*^{2}. Эти провода сначала соединяют с заземлителями, а затем штангой закрепляют их на шинах или проводах линии. Для этой цели на концах проводов заземления используются специальные зажимы с приспособлениями для работы штангой.

Перед использованием средства защиты внимательно осматривают и очищают от пыли. Особое внимание обращают на клеймо, удостоверяющее пригодность средства защиты к использованию, а также на дату испытания средства защиты. Средства защиты непроверенные, без клейма о годности или с клеймом «пробито» нужно немедленно изъять. Проверяют средства защиты в специальных лабораториях, результаты испытаний оформляют протоколом. Испытания ведут в соответствии с инструкциями и нормами.

Изолирующие штанги и клещи испытывают не менее чем трехкратным напряжением один раз в год в установ-

ках с постоянным дежурным персоналом, один раз в 2 года в установках без постоянного дежурного персонала, а в ряде случаев при частом использовании — один раз в 6 месяцев.

Резиновые перчатки, боты и галоши проверяют один раз в 6 месяцев, изолирующие подставки — один раз в 3 года.

§ 8. Общие меры безопасности в электрических установках

Основное условие безопасности обслуживающего персонала в электроустановках — исключить возможность случайного прикосновения к токоведущим частям. Для этого необходимо поддерживать изоляцию в хорошем состоянии, ограждать все токоведущие неизолированные элементы установки, а также располагать токоведущие неизолированные части на высоте, недоступной без специальных приспособлений.

Не допускается заменять плавкие вставки под напряжением. Категорически запрещается определять наличие напряжения на элементах установки, прикасаясь к ним руками. Для этой цели нужно использовать указатель низкого напряжения типа УНН или контрольную лампу.

Для распознавания назначения различных частей электрооборудования в электроустановках их маркируют и окрашивают в разные цвета. Токоведущие фазы окрашивают в зеленый, желтый и красный цвета, а проводники защитного заземления — в черный цвет. Заземляющие, нулевые провода и шины окрашивают в фиолетовый цвет с черными полосками через каждые 150 *мм*.

Чтобы предупредить персонал о включенном или выключенном состоянии различных элементов в электрической установке, пользуются сигнализацией. Надежным средством защиты персонала от прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением, является б л о к и р о в к а.

Помещения закрытых и территория открытых высоковольтных электроустановок должны быть недоступны для посторонних. Ключи от их ограждений хранятся у дежурного, который выдает их под расписку лицам административно-технического персонала, имеющим разрешение на

осмотр, а также руководителям ремонтных и монтажных работ при одновременном оформлении допуска по наряду.

Ремонтные работы в сетях низкого напряжения ведут при снятом напряжении два электромонтера одновременно, с тем чтобы при попадании одного из них под напряжение второй мог придти ему на помощь. Для предупреждения ошибочных включений напряжения на линию или в электроустановку, где ведутся ремонтные работы, необходимо между ножами отключенного рубильника прокладывать изолирующий материал, вынимать плавкие вставки предохранителей и вывешивать плакат «Не включать, работают люди».

Если рубильник находится вне поля зрения работающих, то после отключения установки необходимо наложить заземление на участке, где ведутся ремонтные работы. Начало и конец работы регистрируют в дежурном журнале.

Работа под напряжением в электроустановке допускается лишь в том случае, когда отключение установки вызовет серьезное нарушение технологического процесса или приведет к браку выпускаемой продукции. Эту работу проводит специально обученный электрик под наблюдением инженера или техника с соблюдением всех мер предосторожности: использованием ковриков и изолирующих подставок, резиновых перчаток и галош, инструмента с изолированными ручками и т. д.

Каждого электрика, принимаемого на работу, инженер данного предприятия инструктирует по технике безопасности, по оказанию первой помощи пострадавшему и по тушению пожара в электроустановках. После инструктажа и обучения электрика у рабочего места его знания по технике безопасности проверяет специальная квалификационная комиссия. После испытаний ему присуждают соответствующую группу по технике безопасности и выдают свидетельство на право обслуживания электрической установки.

§ 9. Оказание первой помощи пострадавшему от электрического тока

Прежде всего пострадавшего необходимо освободить от действия тока, уложить его на спину; проверить, дышит ли он (по подъему грудной клетки, по отклонению

нитки, полоски бумаги, поднесенных ко рту или носу пострадавшего); проверить пульс (на лучевой артерии у запястья или на сонной артерии на шее); определить состояние зрачка (узкий или широкий), широкий зрачок указывает на резкое ухудшение кровоснабжения мозга. На это должно уйти не более 15—20 *сек*. Одновременно необходимо вызвать врача.

Освобождая пострадавшего от тока, следует соблюдать соответствующие меры предосторожности. Освободить от тока можно, отключив установку. Для этого нужно выключить рубильник, если он находится в непосредственной близости. Если рубильник или другой выключающий аппарат поблизости отсутствует, можно перерубить провода топором с изолированной сухой ручкой. Если под рукой имеется металлический предмет, например кусок провода, можно набросить его на провода и сделать короткое замыкание, которое вызовет перегорание предохранителей и отключение электроустановки. При этом следует остерегаться прикосновения к токоведущей части через металлический предмет.

Если невозможно быстро отключить токоведущие части, которых касается пострадавший, или снять с них напряжение, то следует отделить его от токоведущих частей. Прикосновение при этом к пострадавшему может быть опасным для спасающего. Нельзя прикасаться к голому телу пострадавшего или к его мокрой одежде.

В установках низкого напряжения оторвать пострадавшего от токоведущих частей можно, обернув свою руку сухой одеждой или набросив на него сухую веревку, а также пользуясь в качестве рычага сухой доской или палкой. Можно встать на сверток сухой одежды (костюм, пальто) или сухую доску, табуретку, стул, надеть исправные галоши, подложить под ноги несколько сухих газет или книг, если нет опасности их быстрого промокания. Изолировав себя таким образом от земли, можно действовать одной рукой.

Если нельзя отключить установку с напряжением выше 1000 *в*, то при отделении пострадавшего от тока нужно надеть изолирующие боты, диэлектрические перчатки либо действовать изолирующей штангой или клещами.

Если после освобождения от тока пострадавший дышит и пульс у него есть, его следует тепло укрыть и ждать при-

бытия врача. Нельзя разрешать пострадавшему двигаться и тем более продолжать работать — это может ухудшить его состояние.

Если пострадавший не дышит или дышит очень редко и судорожно, как умирающий, необходимо применить искусственное дыхание.

При прекращении дыхания и остановке сердечной деятельности у пострадавшего быстро наступают необратимые явления в нервных клетках головного мозга, которые управляют жизненно важными функциями организма. Поэтому помощь должна быть оказана как можно скорее.

Для оживления пострадавшего рекомендуется пользоваться двумя основными приемами:

1) делать искусственное дыхание, ритмично вдувая воздух в рот или нос пострадавшего;

2) искусственно поддерживать кровообращение, ритмично надавливая на переднюю стенку грудной клетки. Этим приемом, называемым наружным (закрытым, непрямым) массажем сердца, выталкивают кровь из его полостей в кровеносные сосуды и таким образом способствуют сохранению достаточного кровотока в организме при отсутствии самостоятельной сердечной деятельности.

Помощь обычно оказывают два человека. Если же второго рядом нет, то спасающий должен поочередно проводить искусственное дыхание и массаж сердца в таком порядке.

Сначала, если дыхание и пульс отсутствуют, нужно немедленно сделать пострадавшему два-три глубоких вдувания воздуха в рот или нос, затем проверить, не появился ли у него пульс. Если пульс отсутствует, искусственное дыхание необходимо продолжить.

При ручных методах искусственного дыхания в легкие поступает недостаточное количество воздуха. Теперь стали применять более эффективный метод искусственного дыхания: вдувание воздуха из легких (изо рта) оказывающего помощь в рот или нос оживляемого. При каждом вдувании («вдохе») в легкие пострадавшего можно легко ввести более 1 *л* воздуха, что намного превышает объем воздуха (240—300 *мл*) при ручных способах искусственного дыхания. При каждом вдувании грудная клетка расширяется, а когда воздух свободно выходит наружу, она опадает.

Техника вдувания в рот или нос заключается в следующем. Пострадавшего кладут на спину, а чтобы воздух проходил свободно, его голову запрокидывают назад, одну руку подкладывают под шею, другой рукой надавливают на темя (рис. 204, *а*). Корень языка при этом отходит от задней стенки гортани и восстанавливается проходимость дыхательных путей. В таком положении головы рот обычно открывается. Если в нем есть слизь, ее вытирают платком или краем рубашки, удаляют изо рта посторонние предметы, затем начинают делать искусственное дыхание.

Вдувать воздух лучше через марлю или платок. При вдувании через рот нос пострадавшего надо закрыть пальцами. Если нельзя полностью охватить рот, следует вдувать воздух через нос, закрыв при этом рот. Маленьким детям воздух вдувают одновременно в рот и нос.

Вдувания нужно повторять через каждые 5—6 *сек*, что соответствует частоте дыхания 10—12 раз в минуту. После каждого «вдоха» (рис. 204, *б*) освобождают рот и нос пострадавшего для свободного выхода воздуха из легких — «выдоха».

Рис. 204. Оживление пострадавшего от поражения током:

а — открывание рта при запрокинутой голове; *б* — искусственный «вдох» — вдувание; *в* — массаж.

Если одновременно с искусственным дыханием нужно проводить наружный массаж сердца (когда оно не работает), воздух следует вдувать в момент прекращения надавливания на грудную клетку или прерывать массаж на время «вдоха» (примерно на 1 *сек*).

Для проведения непрямого массажа сердца у пострадавшего обнажают грудную клетку, расстегивают или снимают одежду. Ладонь у запястья накладывают на нижнюю часть грудины (рис. 204, *в*), ладонь второй руки кладут поверх первой. Ритмично надавливают 60—70 раз в минуту.

Соотношение этих «сердечных толчков» к числу «вдуваний» должно относиться как 5 : 1 или 6 : 1. Надавливание на грудину смещает ее вниз (к спине) в сторону позвоночника. Сердце таким образом сдавливается, и из его полостей выжимается кровь в кровеносные сосуды.

При проведении искусственного дыхания воздух вдувают во время паузы, через 4—6 надавливаний.

Следует остерегаться надавливания на окончания ребер во избежание их перелома. Ни в коем случае нельзя надавливать ниже края грудины на мягкие ткани, так как можно повредить расположенные в брюшной полости органы и в первую очередь печень.

При правильном проведении искусственного дыхания и массажа сердца у пострадавшего появляются следующие признаки оживления: цвет лица приобретает розоватый оттенок вместо серо-землистого с синеватым оттенком, который был до начала оказания помощи; появляются самостоятельные дыхательные движения, которые становятся все более и более равномерными; суживаются зрачки. Их сужение указывает на достаточное снабжение мозга кислородом. Если же зрачки начинают расширяться, необходимо усилить меры по оживлению. Целесообразно положить ноги пострадавшего на 0,5 *м* выше головы. Это будет способствовать лучшему притоку крови в сердце из вен нижней части тела.

Прекращать оживление следует лишь после появления самостоятельного дыхания и работы сердца у пострадавшего. Слабые вдохи даже при наличии пульса следует поддерживать, вдувая при вдохе воздух. Если дыхание есть, а пульс долго не появляется (признак фибрилляции сердца), необходимо продолжать меры по оживлению до прибытия врача или доставить пострадавшего в медицинское учреждение, оказывая помощь в машине.

Прекращать доврачебную помощь можно только, когда появились признаки наступления биологической (необратимой) смерти: отсутствие собственных дыхательных движений у пострадавшего в течение более 1 *ч*; резкое расширение зрачков, остающихся без изменения несмотря на длительное (свыше 1 *ч*) проведение мероприятий по оживлению.

Глава XX

Линии и сети. Расчет проводов

§ 1. Схемы распределения электрической энергии, применяемые в сельском хозяйстве, и их особенности. Выбор местоположения подстанции

Основной особенностью сельских электрических сетей, отличающей их от сетей промышленных или коммунальных, является большая протяженность при сравнительно

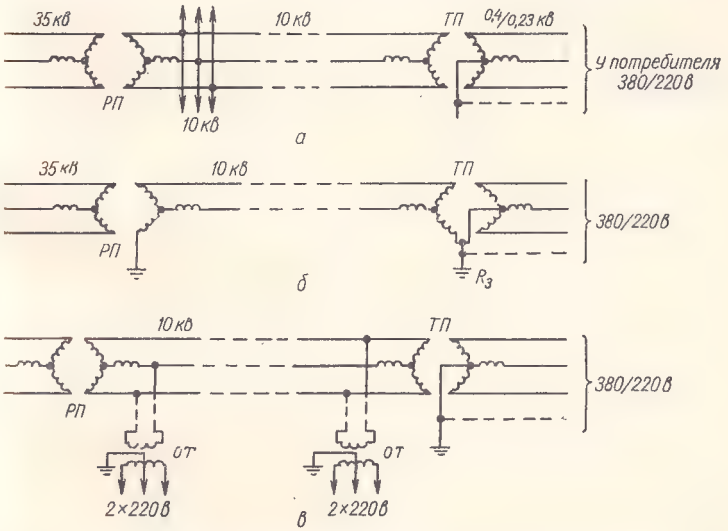


Рис. 205. Системы распределения электроэнергии:
а — трехфазная; *б* — два провода — земля; *в* — смешанная; *РП* — районная подстанция 35/10 *кв*; *ТП* — потребительская подстанция 10/0,4 *кв*; *ОТ* — однофазный трансформатор.

малой передаваемой мощности. В сельскохозяйственных районах применяются следующие системы распределения электроэнергии.

1. Обычная трехфазная система (рис. 205, *а*). На напряжении 10 *кв* по трехфазной линии электрическая энергия распределяется в пределах района в ра-

диусе 15—20 *км* от районной понизительной подстанции *РП* 35/10 *кв* или от электростанции. Низковольтная распределительная сеть на напряжении 380/220 *в* распределяет электрическую энергию в пределах населенного пункта в радиусе до 1,5 *км* от потребительской трансформаторной подстанции *ТП*. Потребительскую подстанцию устанавливают при этом в центре нагрузок. Все сравнительно мощные потребители (пилораму, мастерские, мельницы и т. д.) планируют в непосредственной близости от *ТП* или же *ТП* устанавливают у наиболее крупных существующих потребителей.

В каждом отдельном случае для выбора наиболее экономически целесообразного местоположения подстанции рекомендуется проводить сравнительные расчеты ряда вариантов.

2. Система «два провода — земля» (ДПЗ) используется для распределения энергии главным образом на 10 *кв* (рис. 205, *б*). Эта система разработана в СССР. Вместо третьего провода использована земля. Экономия проводов в этой линии составляет $^1/_3$ по сравнению с трехфазной трехпроводной системой. Экономятся также изоляторы и лесоматериалы, так как линия получается облегченной.

В электрических сетях, выполненных по схеме рисунка 205, *а* с незаземленной нейтралью в сети 10 *кв*, напряжение между каждым из проводов и землей равно фазному напряжению $10/\sqrt{3}$ *в*. При замыкании на землю одного из проводов напряжение двух других повышается относительно земли в $\sqrt{3}$ раз и достигает линейного напряжения. Изоляция в линии 10 *кв*, таким образом, должна быть рассчитана на линейное напряжение. По существующим правилам, при замыкании на землю в линии 10 *кв* с незаземленной нейтралью установка может работать до 2 *ч*. В системе ДПЗ замыкание одного из проводов на землю является нормальным режимом. Однако при замыкании другой фазы на землю установка должна немедленно отключаться.

На потребительской подстанции *ТП* рабочее заземление линии 10 *кв* и заземление нейтрали с низкой стороны объединяют. Одновременно это заземление используется и как защитное для присоединения к нему корпусов машин.

Сопротивление заземления выбирают таким, чтобы напряжение на нем не превышало 50 *в* при нормальном режиме, то есть

$$R_{\text{заз}} \leqslant \frac{50}{I_{\text{макс}}} \text{ ом.} \qquad (201)$$

3. Смешанная система распределения — трехфазно-однофазная (рис. 205, *в*) — предусматривает использование трехфазного напряжения 380/220 *в* для питания более мощных силовых потребителей и прилегающих к ним однофазных токоприемников. Здесь используются обычные трехфазные трансформаторы.

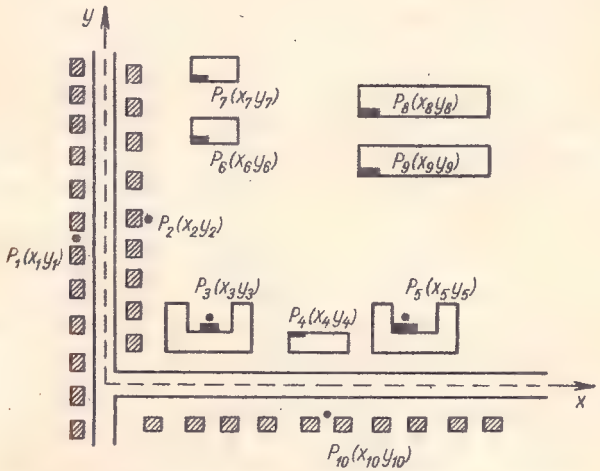


Рис. 206. Определение центра тяжести нагрузок.

Большое число сельских потребителей имеет главным образом однофазные токоприемники (осветительные и бытовые приборы). Для питания их целесообразнее использовать однофазные трансформаторы. Высоковольтную проводку к ним выполняют однофазной двухпроводной. Низшее напряжение в данном случае 2×220 *в* с выводом средней точки, которая заземляется. Напряжение 220 *в* используют для осветительной и бытовой нагрузок, а напряжение 440 *в* — для включения однофазных двигателей.

Потери мощности (энергии) в низковольтных сетях будут наименьшими в том случае, если подстанция будет расположена в центре тяжести нагрузок. Центр тяжести нагрузок определяют следующим образом (рис. 206). На план-карте населенного пункта указаны координаты x и y точек, в которых к низковольтной сети должны быть присоединены потребители, и указаны мощности P этих потребителей. Суммарные мощности жилых домов вдоль улиц P_1, P_2 и P_{10} для упрощения сосредоточены в трех точках. В качестве осей координат можно выбрать, например, две улицы, расходящиеся под прямым углом. Координаты местоположения трансформаторной подстанции находят из равенств

$$x_{\text{тр. п/ст}} = \frac{P_1x_1 + P_2x_2 + P_3x_3 + \dots}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots}, \qquad (202)$$

$$y_{\text{тр. п/ст}} = \frac{P_1y_2 + P_2y_2 + P_3y_3 + \dots}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots}. \qquad (203)$$

После определения координат подстанции и нанесения их на план-карту намечают сети низкого напряжения.

§ 2. Требования, предъявляемые к электрическим сетям

Электрические сети должны надежно подавать потребителю электроэнергию хорошего качества (при стабильных напряжении и частоте) и быть безопасными с точки зрения поражения электрическим током людей или животных и с точки зрения пожарной безопасности.

Чтобы эти требования были удовлетворены, следует правильно выбирать материал, конструкцию и высоту опор, а также тип проводов и их сечения. Опоры выполняют деревянными, железобетонными и в отдельных случаях составными — с приставкой из железобетона и стойкой из дерева. Для деревянных опор используются сосна, а также лиственница, ель и пихта. Бревна опор пропитывают антисептиком. Если пропитать бревна невозможно, их обмазывают антисептиками или бандажируют. Бревна, предназначенные для изготовления опор (стоек и пасынков) в линии 35 *кв*, должны иметь диаметр в верхнем отрубе не менее 18 *см*, а для линий 6—10 *кв* и низкого напряжения — 17 *см*.

Высоту опор и расстояние между ними выбирают с таким расчетом, чтобы обеспечить допускаемые приближения проводов к земле и воде (табл. 23).

Таблица 23

Допускаемые приближения проводов воздушных линий к поверхности земли и воды (*м*)

Характеристика района, в котором проходит линия	Номинальные напряжения линии (*кв*)		
	до 1	1—20	35
Ненаселенная местность	5	6	6
Населенная местность	6	7	7
Районы с очень малой плотностью населения, труднодоступные для транспорта (кочевья, крутые склоны гор и т. п.)	4	4,5	5
Несудоходные и несплавные реки, озера (до уровня высоких вод)	3	3	3
Пересечение железных дорог (до рельса)	7,5	7,5	7,5
Пересечение автогужевых дорог	6	7	7

Если линии пересекаются между собой, то расстояния между проводами должны быть следующие: при напряжении одной линии 6—10 *кв* и другой 6—10 *кв* или менее — 2 *м*; линия 35 *кв* над линией меньшего напряжения — не менее 3 *м*; между линиями связи и линиями низкого напряжения 380/220 *в* — не менее 1 *м*.

Расстояния между проводами линии низкого напряжения при пролете до 30 *м*: вертикальное — не менее 40 *см*, горизонтальное — не менее 20 *см*; при пролетах бо́льших 30 *м*: вертикальное расстояние между проводами — не менее 40 *см*, а горизонтальное — не менее 30 *см*. Расстояния между проводами в линиях высокого напряжения зависят от величины пролета (табл. 24).

Для алюминиевых проводов расстояния между проводами должны быть увеличены на 20%.

I район климатических условий — район, где стенка гололеда на проводах достигает 0,5 *см*; расчетная скорость ветра принимается равной 10 *м/сек*.

II район — стенка гололеда достигает 1 *см*, расчетная скорость ветра 10 *м/сек*.

Таблица 24

Расстояния (*см*) между проводами из меди и стали в линиях 6—10 *кв*

Величина пролета (*м*)	I и II районы климатических условий	III и IV районы климатических условий
До 50	—	100
» 75	80	125
» 100	90	175
» 125	110	200
» 150	130	250
» 175	150	—
» 200	175	—

III район — стенка гололеда 1,5 *см*, расчетная скорость ветра 15 *м/сек*.

IV район — стенка гололеда 2 *см*, расчетная скорость ветра 15 *м/сек*.

Вводы в помещения выполняют таким образом, чтобы высота проводов от земли у здания была не менее 2,75 *м*, но при условии, что они не пересекают проезжей территории и длина ввода от столба до здания не более 10 *м*. При этом высота подвеса провода на столбе не меньше 5,25 *м*. При других условиях ввод в здание должен выполняться так, чтобы низшая точка проводов находилась на высоте не менее 3,5 *м*.

В ряде случаев допускается совместно подвешивать провода линий высокого напряжения (до 10 *кв*) и линий низкого напряжения. При этом расстояние между нижним проводом высокого напряжения (прокладываются выше) и верхним проводом низкого напряжения должно быть не менее 1,5 *м*. Нулевой провод низковольтной сети прокладывают так же, как и на отдельных низковольтных линиях — ниже фазных проводов. Пятый провод — провод централизованного уличного освещения — прокладывают ниже нулевого провода.

Для проводов высокого напряжения на участке совместной прокладки применяют усиленное крепление. Соединяют провода только на изоляторах, а не в пролете. Принимаются и другие меры, исключающие замыкание линии высокого напряжения на линию низкого напряжения. Такое замыкание может вызвать в первую очередь пробой

изоляции токоприемников, а также создать опасность поражения электрическим током людей, занятых эксплуатацией электроустановок низкого напряжения.

Для усиления грозозащиты и предотвращения попадания волн перенапряжения из линии высокого напряжения в линию низкого напряжения по концам участка совместной проводки устанавливают трубчатые разрядники. На крайних опорах совместной проводки выполняют повторные заземления нулевого провода. Их объединяют с заземлениями разрядников. При этом сопротивление заземления не должно превышать 20 *ом*.

На электростанции или подстанции, от которой отходят провода высокого напряжения, рекомендуется выполнять защиту от замыкания на землю с отключением линии.

К проводам линии предъявляются следующие требования.

1. Они не должны нагреваться проходящим по ним током до температуры, опасной в пожарном отношении.
2. Они должны быть механически прочными и выдерживать нагрузки от ветра и обледенения.
3. В проводах не должно быть чрезмерных отклонений напряжения от номинального значения.

§ 3. Конструкции опор. Изоляторы для сетей низкого и высокого напряжения

В зависимости от назначения различают пять основных типов опор: промежуточные, анкерные, угловые промежуточные, угловые анкерные, концевые. Промежуточные опоры служат для поддержания проводов на прямых участках линии. Они не воспринимают усилий, направленных вдоль линии. Анкерные опоры предназначены для восприятия усилий, направленных вдоль линии. Эти опоры устанавливают в тех точках линии, где по условиям местности пролеты по обе стороны от опоры имеют различную величину. Тяжение проводов со стороны бóльшего пролета будет больше тяжения проводов со стороны меньшего пролета. Поэтому анкерные опоры выполняют более прочными и жесткими, чем промежуточные. Угловые опоры устанавливают в местах поворота линии. Они воспринимают усилия, направленные по биссектрисе угла поворота линии, вызванные

тяжением проводов. В качестве угловых опор в ряде случаев используются А-образные промежуточные опоры, устанавливаемые своей плоскостью в направлении действия суммарного усилия от тяжения проводов. При различной длине пролетов в обоих направлениях от точки поворота устанавливают угловую анкерную опору.

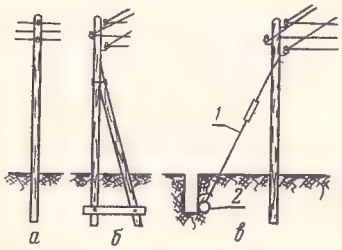


Рис. 207. Конструкции деревянных опор сети 380/220 *в*:
а — стойка «свечка»; *б* — стойка с подкосом; *в*— стойка с проволочной оттяжкой; *1*— оттяжка; *2*— анкер.

Концевые опоры устанавливают при выходе линии с электростанции или подстанции. В нормальных условиях эти опоры воспринимают одностороннее тяжение проводов.

На рисунке 207 представлены различные конструкции деревянных опор низкого напряжения. На рисунке 208, *а* показана типовая промежуточная опора на 10 *кв* с приставкой из дерева. Стойки выполняют из столба стандартной длины 8,5 *м*, а приставки длиной от 6,5 до 8 *м*. Типовые деревянные опоры линии 6—10 *кв* рассчитаны на подвеску

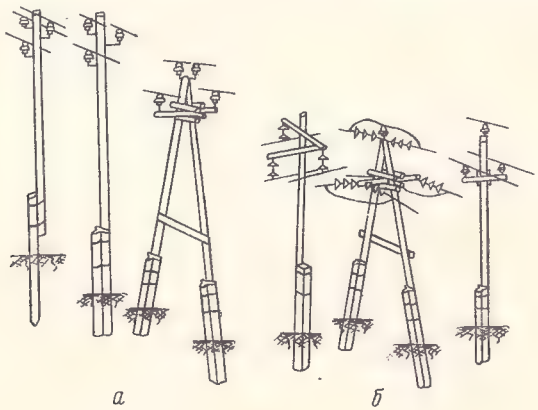


Рис. 208. Опоры высокого напряжения:
а — промежуточные одностоечные с деревянной и железобетонной приставками и анкерная А-образная с железобетонными приставками для линий 10 *кв*; *б*— промежуточные и анкерная опоры с железобетонными приставками для линий 35 *кв*.

алюминиевых проводов сечением до 120 *мм*^{2} и стальных многопроволочных проводов сечением до 50 *мм*^{2}.

Для защиты древесины от гниения деревянные столбы, из которых изготавливают опоры, пропитывают антисептиками в заводских условиях, а также на специальных базах по пропитке или полигонах. Опоры пропитывают в специальных ваннах, заполненных антисептиком, или в автоклавах под давлением. Последний способ — лучший, и ему рекомендуется отдавать предпочтение.

К антисептикам относятся фтористый натрий, динитрофенол, триолит, уралит и др. В состав антисептических паст, которыми покрывают древесину столбов (вместо пропитки), входят битум, зеленое масло и другие продукты нефти.

При строительстве линий электропередачи на те части опор, которые наиболее подвержены загниванию (места заделки в землю, врубки), наносят слой антисептической пасты. После этого столб обертывают бандажом из толя, пергамина, рубероида и т. д. Бандаж покрывают гидроизоляцией — раствором битума и смол.

Срок службы опор, пропитанных антисептиком, составляет более 20 лет.

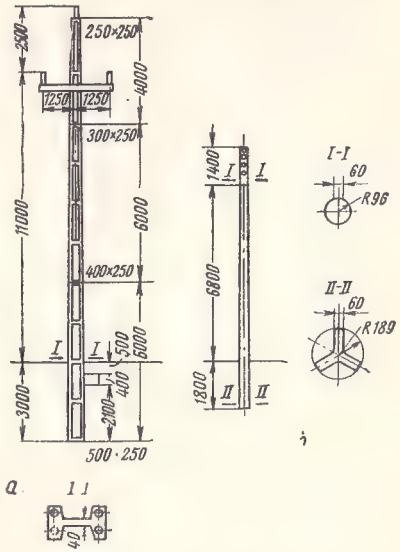


Рис. 209. Железобетонные опоры:
а — промежуточная опора для высокого напряжения типа ПЕ-1 (промежуточная «елочка»); *б* — опора низкого напряжения типа ТНО-II трехгранного сечения.

При строительстве линий широкое применение находят приставки из железобетона (рис. 208, *б*). Они обладают высокой прочностью, долговечностью и сравнительно малой стоимостью. Их изготовление может быть организовано непосредственно на строительных площадках и на специальных полигонах. Выполняют приставки главным образом двутаврового, таврового (Т-образного) и прямоу-

гольного сечений. Для металлического каркаса приставок используют арматурное железо диаметром 8 и 12 *мм*.

В последние годы в практику сооружения линий низкого и высокого напряжения широко внедряются железобетонные опоры (рис. 209). Их изготавливают способом вибрации и центрифугирования. Опоры можно изготавливать в виде блоков и собирать на месте их установки.

Низковольтные железобетонные опоры рассчитаны для подвески до пяти проводов линии электро-

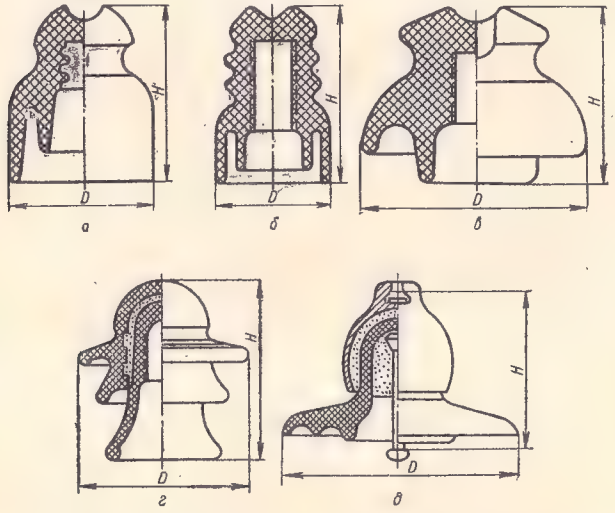


Рис. 210. Изоляторы воздушных линий:
а — типа ШЛН (380/220 *в*); *б* — типа ШО — ответвительный; *в* — типа Ш для линий 6—10 *кв* (штыревой); *г* — ШД для линий 20—35 *кв*; *д* — типа П (подвесной).

сети и до четырех проводов радиосети. Стойка для опор в I и II районах имеет квадратное сечение и длину 9 *м*, а для III и IV районов — двутавровое сечение и длину 9,5 *м*. Разработаны следующие типы опор: промежуточные, переходные, промежуточные перекрестные, ответвительные, анкерные, угловые промежуточные на угол до 60°, угловые анкерные на угол до 90°, концевые. Для линий 6—10 *кв* длина железобетонных опор 11 *м*, сечение — двутавровое. Расположение проводов — горизонтальное на рейке, укрепленной в верхней части опоры.

Разработаны промежуточные, анкерные, угловые опоры. Для линий 35 *кв* длина опор 14—17 *м*.

На рисунке 210 представлены различные типы изоляторов для линий низкого и высокого напряжения.

Изоляторы типа ШЛН (рис. 210, *а*) (штыревые линейные наружной установки) имеют порядковые номера от 1 до 4 (соответственно меняются размеры H — от 98 до 48 *мм* и D — от 88 до 52 *мм*) и предназначены для линий до 500 *в*. Вместо них можно использовать аналогичные по конструкции изоляторы типа ТФ (телеграфные фарфоровые).

На рисунке 210, *б* представлен изолятор типа ШО (штыревой ответвительный). Эти изоляторы выпускают двух типов: ШО-16 ($H=87$, $D=60$ *мм*) для проводов до 16 *мм*^{2} и ШО-70 ($H=120$, $D=80$ *мм*) для проводов до 70 *мм*^{2}.

На рисунке 210, *в* представлен штыревой высоковольтный изолятор Ш-10 на 10 *кв* ($H=105$, $D=140$ *мм*); ему аналогичен Ш-6 на 6 *кв*. На рисунке 210, *г* показан изолятор ШД-20 (20 *кв*, $H=190$, $D=185$ *мм*), такой же вид имеет и ШД-35 (35 *кв*, $H=275$, $D=255$ *мм*).

Подвесные изоляторы типа П (рис. 210, *д*) набирают в гирлянду, причем число их в гирлянде зависит от напряжения ($H=155\div190$, $D=260\div315$ *мм*).

§ 4. Типы проводов для электрических линий

Для электрических сетей применяют голые медные, алюминиевые, стале-алюминиевые и стальные провода. Для внутренних проводок применяют медные и алюминиевые изолированные провода.

М е д ь — лучший проводниковый материал и лучше других материалов противостоит коррозии. Она значительно дороже алюминия. Поэтому голые медные провода применяют в редких случаях, когда алюминий в данном районе недолговечен из-за коррозии (районы химических заводов, побережье моря и т. д.). Для голых проводов применяют твердотянутую медь. Ее проводимость $\gamma=53$ *м/ом·мм*^{2}.

А л ю м и н и й имеет проводимость примерно в 1,6 раза меньшую, чем медь: 32—34 *м/ом·мм*^{2}. На открытом воздухе он хорошо противостоит коррозии. Алюминиевые провода всегда выполняются многопроволочными, так как однопроволочные не обеспечивают достаточной механической прочности.

Сталь (железо) имеет проводимость в 7,5 раза меньшую, чем медь, и в 4,5 раза меньшую, чем алюминий: 7 *м/ом·мм*^{2}. Сталь находит применение в сетях с малой плотностью нагрузки. Для защиты от быстрого разрушения стальные провода, изготавливают оцинкованными (гальваническое покрытие тонким слоем цинка).

В стале-алюминиевых проводах сердечник состоит из оцинкованных стальных проволок, вокруг которых навивают алюминиевые провода. Стальные проволоки применяют здесь для увеличения механической прочности проводов.

В биметаллических проводах стальная проволока покрыта слоем алюминия или меди (прокатыванием).

Провода обозначают следующими буквами: М — медные, А — алюминиевые, ПС — провод стальной многопроволочный, ПСО — провод стальной однопроволочный, ПМС — провод многопроволочный из медистой стали, АС — стале-алюминиевый провод, АСО — стале-алюминиевый облегченной конструкции, АСУ — стале-алюминиевый усиленной конструкции. Цифра после буквы означает сечение провода в *мм*^{2} для проводов марок М, А, ПС, АС. Например, М16 означает — провод медный, 16 *мм*^{2}; ПС50 — провод стальной, 50 *мм*^{2}; АС50 — провод стале-алюминиевый, с сечением алюминиевых жил 50 *мм*^{2}. Однопроволочные стальные провода обозначают так: ПСО3,5, ПСО4, ПСО5, при этом цифра указывает диаметр провода в *мм*.

Изолированные провода (табл. 25) изготавливают из мягкой меди и алюминия. В качестве изоляции используют покрытие из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной вулканизированной резиной. В последнее время широко применяют изоляцию проводов и кабелей из полихлорвинила и других пластических материалов.

Шнуром называют провод, состоящий из двух или более изолированных гибких жил, заключенных в общую оболочку (оплетку или шланг). Кабель — одна или несколько скрученных изолированных жил, заключенных в защитную герметическую металлическую (алюминиевую или свинцовую), резиновую или полихлорвиниловую оболочку.

В таблице 26 приведены типы кабелей для силовых установок до 660 *в*.

Таблица 25

Номенклатура шнуров и проводов

Марка	Характеристика	ГОСТ или ТУ	Номинальное напряжение (*в*)	Число жил (шт.)	Предельные сечения (*мм²*)
Шнуры с медной жилой с резиновой (Р) или пластмассовой (П) изоляцией					
ШПВ	Шнур бытовой	ГОСТ 7399-55	220	2	0,5—0,75
ШВРШ	Шнур бытовой	ГОСТ 7399-55	220	2,3	0,75—1
ПРВД	Шнур установочный	ТУПК2-59	380	2	0,5—6
Провода установочные с резиновой изоляцией					
ПР500	С медной жилой в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом	ГОСТ 1977-54	500	1	0,75—400
ПРГ500	То же, с гибкой медной жилой	ГОСТ 1977-54	500	1	0,75—400
АПР500	То же, с алюминиевой жилой	ГОСТ 5352-52	500	1	2,5—400
ПРТО500	С медной жилой в оплетке из хлопчатобумажной ткани, пропитанной противогнилостным составом, для прокладки в трубах	ВТУЭ-128-43	500	1	1—500
				2, 3, 4	1—120
АПРТО500	То же, с алюминиевой жилой	ТУКП-37-58	500	1	2,5—400
				2, 3, 4	2,5—120
ПРВ	С медной жилой с полихлорвиниловой оболочкой	ТУКП2-59	500	1	0,75—6
ПРВГ	То же, с медной гибкой жилой	ТУКП2-59	500	1	0,75—6
АПРВ	То же, с алюминиевой жилой	ТУКП2-59	500	1	2,5—6
ТПРФ	С медной жилой в трубчатой металлической оболочке	ГОСТ 1843-46	500	1, 2, 3, 4	1—10
АТПРФ	То же, с алюминиевыми жилами	ТУКП98-60	500	2,3	2,5—4

Продолжение

Марка	Характеристика	ГОСТ или ТУ	Номинальное напряжение (*в*)	Число жил (шт.)	Предельные сечения (*мм*²)
Провода установочные с полихлорвиниловой (В) или найритовой (Н) изоляцией					
ПВ	С медной жилой	ГОСТ 6323-62	500	1	0,75—95
АПВ	То же, с алюминиевой жилой	ГОСТ 6323-62	500	1	2,5—120
ППВ	С медными жилами, плоский, с разделительным основанием	ГОСТ 6323-62	500	2,3	0,75—4
АППВ	То же, с алюминиевыми жилами	ГОСТ 6323-62	500	2,3	2,5—6
ППВС	С медными жилами, плоский, без разделительного основания	ГОСТ 6323-62	500	2,3	0,75—4
АППВС	То же, с алюминиевыми жилами	ГОСТ 6323-62	500	2,3	2,5—6
АПН	С алюминиевой жилой, плоский, с найритовой изоляцией	ТУКП36-58	500	1	2,5—6
				2,3	2,5—4
АТРГ	Тросовый, с алюминиевыми жилами, в оболочке из найритовой резины	ТУКП69-59	700	3	4—6
				4	4—35
Провода с медной жилой термостойкие для зарядки светильников					
РКГМ	С изоляцией из поликсилоксановой резины	ВТУ МЭП ОАА, 505.027-53	380	1	0,75—95
ПРКС	С изоляцией из кремний-органической резины	—	500	1	0,75—1,5
ПРБС	То же	—	500	1	0,75—1,5
Шнуры и кабели шланговые с медной жилой и резиновой изоляцией					
ШРПЛ	Шнур легкий	ГОСТ 2650-44	220	2	0,5—1,5
ШРПС	Шнур средний	ГОСТ 2650-44	500	2, 3, 4	0,75—1,5
КРПТ	Кабель тяжелый	ГОСТ 2650-44	500	1, 2, 3, 4	2,5—70

Таблица 26

Кабели с резиновой (Р), полихлорвиниловой (В) и полиэтиленовой (П) изоляцией и в оболочке из найрита (Н) или полихлорвинила (В)

Марка	Характеристика	ГОСТ или ТУ	Номинальное напряжение (*в*)	Число жил (шт.)	Предельные сечения (*мм*²)
НРГ, ВРГ	С медной жилой, голый	ГОСТ 433-58	660	1	1—240
				2, 3, 4	1—185
АНРГ, АВРГ	То же, с алюминиевой жилой	ГОСТ 433-58	660	1	4—240
				2, 3, 4	4—185
НРБГ, ВРБГ	С медной жилой, бронированный, без наружного покрова	ГОСТ 433-58	660	2, 3, 4	4—185
АНРБГ,АВРБГ	То же, с алюминиевой жилой	ГОСТ 433-58	660	2, 3, 4	4—185
АВВГ	С алюминиевой жилой, голый	МРТУ2-43-3-61	660	2, 3, 4	2,5—35
АВВБ, АПВБ	С алюминиевой жилой, бронированный, с наружным покровом	МРТУ2-43-61	660	2, 3, 4	2,5—35

Номенклатура кабелей и проводов для сельского хозяйства

АПВГ	Кабель облегченный, с алюминиевой жилой, с полиэтиленовой изоляцией в полихлорвиниловой оболочке	МРТУ2-43-13-61	660	2	2,5—6
				3, 4	4—50
АСВ-1 и АСВ-2	Кабели самонесущие со стальным тросом, с алюминиевыми жилами, с изоляцией из светостойкого полихлорвинилового пластиката	ТУО17-32-63	380	2, 3, 4	2,5—4
				4	6—10
АППР	Провод установочный, с алюминиевой жилой и резиновой изоляцией, для прокладки по деревянным основаниям	ТУО17-31-63	380	1, 2	2,5—6

Примечание. Кабели АСВ-1 и АСВ-2 предназначены для вводов в здания от воздушной линии при длине перекидки до 25 *м*. Трос кабеля АСВ-1 допускает усилие до 230 *кГ*, а кабеля АСВ-2—600 *кГ*.

Промышленность выпускает большое число электрических кабелей. Они подразделяются на силовые и контрольные. Силовые кабели изготавливают с изоляцией из пропитанной бумаги (в обозначении марки кабеля не указываются) или с резиновой изоляцией (в обозначении марки указывается буква Р), с медными или алюминиевыми (А) жилами. Силовые кабели различают по числу и сечению жил, конструкции, типам защитных покровов и номинальному напряжению. По числу жил — одно-, двух-, трех- и четырехжильные. Кабели в свинцовой оболочке в обозначении имеют букву С, в алюминиевой — А, в полихлорвиниловой — В, в негорючей маслостойкой найритовой оболочке — Н. Оболочка может быть голая (Г) или бронированная (Б) стальными лентами или проволоками.

Одножильные силовые кабели изготавливают с сечением жилы от 2,5 до 800 *мм*^{2}, двухжильные — от 2,5 до 150 *мм*^{2}, трехжильные — от 2,5 до 240 *мм*^{2}, четырехжильные — от 4 до 185 *мм*^{2}.

Контрольные кабели (в обозначении первая или вторая буква К) предназначаются для работы в электрических сетях до 500 *в* переменного или 1000 *в* постоянного тока. Их различают по числу (до нескольких десятков) и сечению (не более 10 *мм*^{2}) токопроводящих жил, конструкции и типам защитных покровов (как и силовые кабели).

§ 5. Выбор сечения проводов по условиям нагрева

Предельные допустимые температуры нагрева для проводов и кабелей следующие: голые провода — 70°; изолированные провода в резиновой или полихлорвиниловой изоляции — 55°; провода в теплостойкой резиновой изоляции — 65°; кабели с бумажной изоляцией на напряжение до 3 *кв* — 80°; кабели с бумажной изоляцией на напряжение до 6 *кв* — 65°; кабели с бумажной изоляцией на напряжение до 10 *кв* — 60°. Длительно допустимые нагрузки в амперах на голые и изолированные провода и кабели рассчитывают и берут из таблиц (табл. 27).

Ток плавления медного провода можно определить по формуле

$$I_{пл} = \frac{d - 0{,}05}{0{,}031}, \qquad (204)$$

где d — диаметр провода (*мм*).

Таблица 27

Длительно допустимые токи (токовые нагрузки) в амперах на провода и шнуры с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией с медными и алюминиевыми жилами, а также на голые провода воздушных линий

Стандартное сечение провода (*мм*²)	Медные изолированные провода		Алюминиевые изолированные провода		Голые провода вне помещения			Примечания
	открытая проводка	три провода в трубе	открытая проводка	три провода в трубе	медные М	алюминиевые А	стальные ПС	
0,5	11	—	—	—	—	—	—	Для одинарных стальных проводов:
0,75	15	—	—	—	—	—	—	ПСО3 23*а*
1,0	17	15	—	—	—	—	—	ПСО3,5 26*а*
1,5	23	17	—	—	—	—	—	ПСО4 30*а*
2,5	30	25	24	19	—	—	—	ПСО5 35*а*
4,0	41	35	32	28	50	—	—	
6,0	50	42	39	32	70	—	—	
10,0	80	60	55	47	95	—	—	
16	100	80	80	60	130	105	—	Между диаметром провода d и его сечением S существует такая зависимость:
25	140	100	105	80	180	135	60	
35	170	125	130	95	220	170	75	
50	215	170	165	130	270	215	90	$S = \frac{\pi d^2}{4}$;
70	270	210	210	165	340	265	125	
95	330	225	225	200	415	320	135	$d = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}}$.
120	385	290	295	220	485	375	—	

§ 6. Выбор плавких вставок предохранителей по условиям нагрева

Предохранители устанавливают на всех ответвлениях, если сечение провода на ответвлении меньше сечения провода в магистрали, на вводах в помещения и в головных участках сети. Для избирательности действия необходимо, чтобы каждый следующий предохранитель по направлению к источнику тока имел номинальный ток плавкой вставки хотя бы на одну ступень больше, чем предыдущий. Время перегорания плавкой вставки зависит от величины протекающего тока. Если протекающий в плавкой вставке ток больше номинального только на 30%, то плавкая вставка выдержит этот ток неопределенно долгое время, а при токе, большем номинального на 60%,— в течение часа. При токе в 2—2,5 раза больше номинального плавкая вставка перегорает за несколько секунд. Но со временем плавкая вставка окисляется, ее сечение уменьшается, и она перегорает при меньших токах, чем новая.

При защите асинхронных электродвигателей следует учитывать то обстоятельство, что пусковой ток двигателя в 5—7 раз больше номинального, а время пуска двигателя может продолжаться несколько секунд. Поэтому в таких случаях выбирать плавкую вставку по номинальному току нельзя: она перегорит при пуске. А это, в свою очередь, может привести к тому, что сечение плавкой вставки может оказаться больше сечения провода, который выбирается по номинальному току нагрузки. Поэтому провода и плавкие вставки выбирают согласованно. В соответствии с «Правилами устройства электроустановок» различают силовые и осветительные сети в различных по характеру помещениях.

В осветительных сетях жилых домов номинальные токи плавких вставок предохранителей принимают равными расчетному току нагрузки в данной сети или берут их несколько меньшими. Расчетный ток нагрузки может быть равен допустимым токам по условиям нагрева проводов.

В силовой сети номинальный ток плавкой вставки определяют по формуле

$$I_{\text{вст}} \geqslant \frac{I_{\text{макс}}}{\alpha}, \qquad (205)$$

где $I_{\text{макс}}$ — максимальный ток нагрузки. Если на данном ответвлении сети установлен один двигатель, то следует

принимать $I_{макс}=I_{пуск}$. Если на данном ответвлении работает ряд двигателей, то максимальный ток определяется так:

$$I_{макс}=k\cdot\sum_{1}^{n-1}I_{р}+I_{пуск}, \qquad (206)$$

где k — коэффициент одновременности;

$\sum_{1}^{n-1}I_{р}$ — сумма рабочих токов (с учетом коэффициента загрузки каждого из двигателей), за исключением одного двигателя, имеющего наибольший пусковой ток $I_{пуск}$.

Величина коэффициента α в формуле (205) колеблется в пределах от 1,6 до 2,5, в зависимости от условий работы двигателя. Для ответвлений с обычными короткозамкнутыми двигателями с нормальными условиями работы (редкие пуски, продолжительность разбега 5—10 *сек*) $\alpha=2{,}5$.

Для двигателей с тяжелыми условиями работы (частые пуски, продолжительность разбега до 40 *сек*) $\alpha=1{,}6\div2$.

После выбора плавкой вставки по приведенным формулам следует проверить соответствие данной плавкой вставки проводам сети. Для этой проверки пользуются таблицами наибольших длительно допустимых нагрузок и предельно допустимых величин номинальных токов плавких вставок для различных проводов и способов проводки*.

§ 7. Расчет проводов на потерю напряжения

О т к л о н е н и я н а п р я ж е н и я о т н о м и н а л ь н о г о означают постепенные, продолжительные изменения напряжения в сторону уменьшения или увеличения от номинального, в зависимости от нагрузки. Нагрузка в линии вызывает потерю напряжения. В отличие от отклонения напряжения к о л е б а н и е м н а п р я ж е н и я называются кратковременные изменения напряжения, вызванные, например, пуском короткозамкнутого двигателя.

Величину отклонения напряжения выражают в вольтах или в процентах. Для иллюстрации отклонения напряжения и аналитического его выражения рассмотрим нагрузку

* См., например, «Справочник по производству и распределению электрической энергии в сельском хозяйстве». Под редакцией И. А. Будзко, Сельхозгиз, 1959, стр. 521—524.

трехфазной сети (рис. 211, *а*). Для схемы замещения одной из фаз (рис. 211, *б*) построим векторную диаграмму (рис. 211, *в*), из которой выразим разницу между фазным напряжением в конце линии $U_{кф}$ и в начале $U_{нф}$. Из векторной диаграммы можно выразить геометрическую разность векторов напряжений, равную $ав = IZ$, где I — ток нагрузки в фазе, а Z — полное сопротивление линии (*ом*), равное $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$. В свою очередь, R — активное сопротивление линии, равное произведению удельного омического сопротивления r_0 провода линии (*ом/км*) на длину линии (*км*), то есть

$$R = r_0 l;$$ аналогично $$X = x_0 l,$$

где x_0 — индуктивное удельное сопротивление провода линии (*ом/км*).

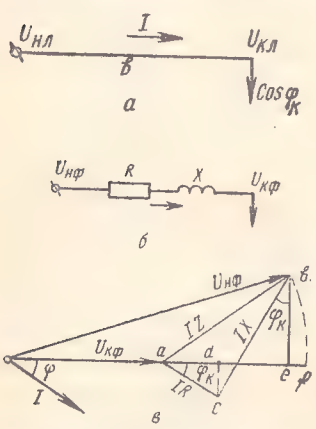


Рис. 211. К расчету проводов на потерю напряжения:

а — расчетная схема линии с нагрузкой на конце; *б* — схема замещения одной из фаз; *в* — векторная диаграмма фазных напряжений.

Отрезок *ав*, представляющий собой геометрическую разность векторов напряжений в начале и в конце линии, выражает падение напряжения. Алгебраическая разность векторов напряжений, соответствующая отрезку $af = U_{нф} - U_{кф}$, называется потерей напряжения. При расчете проводов учитывают не падение напряжения, а потерю напряжения, поскольку работа токоприемников зависит от абсолютной величины подводимого к ним напряжения.

Для облегчения теоретических расчетов потерь напряжения пренебрегают величиной потери напряжения, приходящейся на отрезок *ef*, и принимают ее равной величине отрезка *ае*. Этот отрезок можно выразить так:

$$ae = ad + de = ac \cdot \cos\varphi_к + cв \cdot \sin\varphi_к;$$ но $ac = IR$, а $cв = IX$,

тогда потеря напряжения $\Delta U_ф$ в фазе (отрезок *ае*) окончательно

$$\Delta U_ф = I(R\cos\varphi_к + X\sin\varphi_к). \qquad (207)$$

Потеря напряжения между двумя фазами (линейная)

$$\Delta U_л = \sqrt{3} \cdot \Delta U_ф = \sqrt{3}(IR\cos\varphi_к + IX\sin\varphi_к). \quad (208)$$

Умножив и поделив правую часть полученной формулы на $U_{кл}$ (конечное линейное), получим:

$$\Delta U_л = \frac{\sqrt{3}IU_{кл}\cos\varphi_к R + \sqrt{3}IU_{кл}\sin\varphi_к X}{U_{кл}} = \frac{PR + QX}{U_{кл}}, \quad (209)$$

где P — активная мощность нагрузки (*вт*);

Q — реактивная мощность (*вар*);

$U_{кл}$ — линейное напряжение в конце линии (*в*).

С достаточной точностью вместо неизвестного $U_{кл}$ можно брать номинальное линейное напряжение. В практических расчетах индуктивное сопротивление кабельных линий можно принимать равным 0,07—0,08 *ом/км*; воздушных при напряжении выше 1000 *в* — 0,4 *ом/км*, а при напряжении до 1000 *в* — 0,3 *ом/км*.

Действующими нормами установлено, что в сельских электрических сетях напряжение на зажимах токоприемников не должно повышаться больше чем на +7,5% и снижаться больше чем на —10% от номинального напряжения сети. Электрическую сеть проектируют таким образом, чтобы отклонения напряжения при максимальной нагрузке не превосходили — 10%, а при минимальной нагрузке, которую принимают равной 0,25 от максимальной, не превосходили +7,5%. Если известна действительная минимальная нагрузка, то принимают ее.

Источником питания, задающим исходную величину напряжения, является генератор на электростанции или мощная подстанция с регулированием напряжения. Между источником питания и токоприемником расположено несколько элементов сети, на которых теряется напряжение. Поэтому перед расчетом воздушных линий составляют приближенные таблицы отклонения напряжений для всех элементов сети, начиная от источника электроснабжения и кончая потребителем.

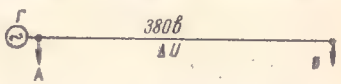


Рис. 212. К расчету сети 380/220 *в* небольшой электростанции.

Ниже приводится несколько примеров составления расчетных таблиц отклонения напряжения.

Случай 1. Электрическая станция работает на сеть низкого напряжения (рис. 212). Генератор станции может

иметь режим постоянного напряжения, когда независимо от нагрузки напряжение на его зажимах поддерживается на +5% выше номинального. На малых станциях, работающих изолированно, широко применяется также встречное регулирование напряжения, когда с увеличением нагрузки напряжение на зажимах генератора повышают до +10% сверх номинального при максимальной нагрузке и снижают до номинального значения (отклонение напряжения равно 0%) при минимальной нагрузке. Составляем таблицы для двух случаев: напряжение генератора $U_н$+ +5% — постоянное, а при встречном регулировании принимаем при полной нагрузке $U_н$+7,5% и при минимальной $U_н$+0%. В первом случае превышение напряжения генератора задано. Отклонение напряжения у потребителя (табл. 28) не должно выходить за рамки —10% и +7,5%. Тогда расчетные потери напряжения в сети 380 *в* могут быть приняты как разность между допустимым отклонением напряжения у потребителя (—10%) и отклонением напряжения генератора (+5%) в первом случае. Во втором случае имеем (—10%)—(+7,5%)= =—17,5%.

Таким образом, при расчете низковольтной сети для распределения энергии от электростанции до самого дальнего потребителя (в точке *Б*) принимаем потерю напряжения в линии в первом случае —15%, а во втором (встречное регулирование) —17,5%, то есть сеть во втором случае обойдется дешевле (потребуется провод меньшего сечения).

Из таблицы отклонений напряжения видно, что наиболее тяжелые условия у самого дальнего потребителя при максимальной нагрузке в сети: вместо 380 *в* стандартных он получит 380 — 10% =342 *в*. Двигатели будут работать в тяжелом режиме. В то же время близкорасположенный потребитель будет страдать от избытка напряжения по сравнению с номинальным, будут часто перегорать лампы: 220 +7,5% =237 *в*.

Случай 2. Электрическая станция с сетью высокого напряжения (рис. 213). Между генератором и потребителем имеется два трансформатора и сеть высокого напряжения. Перед тем как составить таблицу отклонения напряжений, рассмотрим, как влияет трансформатор на отклонение напряжения в схеме.

Надбавки напряжения в силовых трансформаторах. Как было рассмотрено выше

Таблица 28

Отклонения напряжения

Элементы сети	Напряжение на генераторе постоянное: $U_н$ +5%				Напряжение на генераторе при встречном регулировании			
	потребитель в точке *А*		потребитель в точке *Б*		потребитель в точке *А*		потребитель в точке *Б*	
	нагрузка (%)							
	100	25	100	25	100	25	100	25
Генератор Сеть 380 *в*	+5 0	+5 0	+5 **—15**	+5 —3,75	+7,5 0	+0 0	+7,5 **—17,5**	+0 —4,3
Отклонения напряжения у потребителя	+5%	+5%	(+5—15)=—10	(+5—3,75)=+1,25	+7,5	0	—10	0

Таблица 29

Надбавки напряжения в трансформаторах

Трансформатор на 10 *кв*				Трансформатор на 6 *кв*			
зажимы высокого напряжения	надбавки высокого напряжения	надбавки низкого напряжения	итого	зажимы высокого напряжения	надбавки высокого напряжения	надбавки низкого напряжения	итого
9 500	—5%	+5%	0%	5700	—5%	+5%	0%
10 000	0	+5%	+5%	6000	0%	+5%	+5%
10 500	+5%	+5%	+10%	6300	+5%	+5%	+10%

(гл. IX), трансформаторы для понизительных потребительских подстанций со стороны высокого напряжения имеют отпайки, позволяющие менять число витков первичной обмотки, а следовательно, и коэффициент трансформации в пределах ±5%. Со стороны низкого напряжения получа-

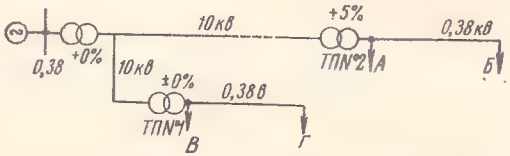


Рис. 213. К таблице отклонений напряжения при нескольких ступенях напряжения.

ют 400 *в*, то есть 380 +5%. Трансформатор 6/0,4 *кв* имеет следующие отпайки с высокой стороны: 5700 *в* (—5%), 6000 *в* (±0%), 6300 *в* (+5%), а трансформатор 10/0,4 *кв* соответственно имеет: 9500 *в*, 10 000 *в*, 10 500 *в*. Таким образом, суммарную надбавку напряжения, учитывая высоковольтную и низковольтную обмотки, можно получить в пределах, указанных в таблице 29.

Представим теперь, что понижающий трансформатор используется в качестве повышающего и со стороны низкого напряжения к обмотке подведено напряжение 380 *в* (400—5%). Чтобы получить со стороны высокого напряжения стандартные 10 000 и 6 000 *в*, необходимо использовать надбавки +5%.

При составлении таблиц отклонения напряжения потери напряжения в трансформаторах принимают равными 4—5% при нагрузке 100% и 1—1,25% при нагрузке 25%.

Если высоковольтная линия уже имеется, то потери напряжения в ней могут быть определены по формулам для трехфазной сети, которые приведены ниже.

Составляем таблицы отклонений напряжения в элементах сети (табл. 30 и 31). Методом подбора отпаек у трансформаторов выбираем наиболее целесообразный режим работы. А затем из таблицы находим потери напряжения, на которые следует считать низковольтную сеть.

Таким образом, расчет низковольтной сети ведем на потерю напряжения (до самого дальнего потребителя) — 6%. При этом для внутренних проводок рекомендуется всегда иметь запас — 0,3—0,5%. Тогда наружные воздуш-

Таблица 30

Для низковольтной сети понизительной подстанции ТП № 1

Элементы линии электропередачи от электростанции до потребителя	Нагрузка (%)	
	для дальнего потребителя (*Г*) 100	для ближнего потребителя (*В*) 25
Генератор (принимаем, как установлено на электростанции)	+5%	+5%
Трансформатор повысительной подстанции 0,38/10 *кв* (как установлено на подстанции)	0	0
Потери напряжения в повышающем трансформаторе (принимаем в соответствии с вышеизложенным)	—5%	—1,25%
Потери напряжения в высоковольтной сети подсчитываем. Предположим, они равны. .	—4%	—1%
Надбавки в понижающем трансформаторе выбираем таким образом, чтобы напряжение у потребителя не выходило за пределы —10 — +7,5%	+5%	+5%
Потери напряжения в трансформаторе 10/0,4 *кв*	—5%	—1,25%
Потери в сети низкого напряжения выбираем такие, чтобы суммарное напряжение у потребителя было равно $U_н$ —10%	—6%	0
Отклонения напряжения у потребителя . . .	—10%	+6,5%

Примечание. Если взять надбавки напряжения +10%, то у ближайшего потребителя при нагрузке 25% напряжение будет равно +11,5%; это недопустимо.

Таблица 31

Для низковольтной сети от понизительной подстанции ТП № 2

Элементы линии электропередачи от электростанции до потребителя	Нагрузка (%)	
	100 в точке *А*	25 в точке *Б*
Генератор	+5%	+5%
Повысительный трансформатор, надбавки . .	0	0
» » потери	—5%	—1,25%
Сеть 10 *кв* рассчитываем. Предположим, что она длиннее, чем до подстанции № 1, в два раза и выполнена проводом того же сечения	—8%	—2%
Понизительный трансформатор, надбавки . .	+5%	+5%
» » потери	—5%	—1,25%
Сеть низкого напряжения	—2%	0
Отклонение напряжения у потребителя . . .	—10%	+5,5%

ные сети низкого напряжения следует рассчитывать, исходя из потерь в них, равных 5,5—5,7%.

Таким образом, для низковольтной сети у нас в запасе только 2% потери напряжения. Чтобы удешевить сеть низкого напряжения, следует пересчитать сечение провода в линии высокого напряжения.

§ 8. Основные формулы для расчета проводов на потерю напряжения

В общем виде уравнение для определения потери напряжения в проводах линии было приведено выше (207):

$$\Delta U = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X \sin \varphi).$$

В сети низкого напряжения величина индуктивного сопротивления весьма мала, и значением произведения $X \sin \varphi$ можно пренебречь. Тогда равенство (207) с учетом, что $R = \frac{l}{\gamma S}$, перепишется так:

$$\Delta U = \sqrt{3} I \frac{l}{S\gamma} \cos \varphi. \qquad (210)$$

Умножив и поделив на величину U, получим:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} U I \cos \varphi \, l}{\gamma U S} = \frac{Pl}{\gamma U S}. \qquad (211)$$

Равенство (211) можно переписать относительно сечения провода S так:

$$S = \frac{Pl}{\gamma U \Delta U}, \qquad (212)$$

где P — мощность нагрузки (*вт*);
l — длина линии (*м*);
γ — проводимость материала проводника;
U — номинальное линейное напряжение сети (*в*);
ΔU — потеря напряжения в сети из формулы (211) получается расчетная, а в формулу (212) подставляется допустимая в вольтах.

Формулы (211) и (212) справедливы для трехфазной нагрузки, приложенной на конце линии. Нулевой провод выбирают на одно стандартное сечение ниже, чем сечение фазных проводов. Ниже приводятся формулы для других схем низковольтной сети.

Двухфазное трехпроводное ответвление от трехфазной сети (2 фазы+0);

$$S=\frac{2{,}25Pl}{\gamma\Delta UU}. \qquad (213)$$

Однофазное ответвление от трехфазной линии (1 фаза+0):

$$S=\frac{2Pl}{\gamma\Delta UU}. \qquad (214)$$

Приведенные формулы справедливы для проводов из меди и алюминия, индуктивным сопротивлением которых в низковольтных линиях можно пренебречь.

Пример 1. Выбрать сечение алюминиевых проводов для трехфазной линии 380/220 *в*, если длина линии $l=500$ *м*, а нагрузка $P=10$ *квт*. Из таблицы допустимых отклонений напряжения находим:

$$\Delta U=-5\%\ \text{(то есть 20 } в\text{)}$$

Из формулы (212)

$$S=\frac{10\,000\cdot 500}{380\cdot 20\cdot 32}=20{,}5\ мм^2.$$

Принимаем стандартное сечение А25. Тогда истинная потеря напряжения

$$\Delta U=\frac{10\,000\cdot 500}{380\cdot 32\cdot 25}=16\ в.$$

Нулевой провод выбираем сечением А16.

Пример 2. Выбрать провод для трехфазной линии низкого напряжения с рассредоточенной нагрузкой, как показано на схеме (рис. 214). Провод — алюминиевый, напряжение — 380/220 *в*, допустимая потеря напряжения — 7% (из таблицы отклонений напряжения):

$l_1=100$ *м*; $P_1=20$ *квт*;
$l_2=250$ *м*; $P_2=10$ *квт*;
$l_3=400$ *м*; $P_3=10$ *квт*.

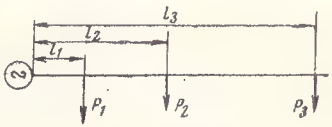


Рис. 214. К примеру 2.

В случае, который указан на рисунке 214, равенство (212) примет вид:

$$S=\frac{\Sigma P_i l_i}{\gamma\Delta UU}. \qquad (215)$$

Отсюда

$$S=\frac{20\,000\cdot 100+10\,000\cdot 250+10\,000\cdot 400}{32\cdot 7\cdot 380}=$$

$$=\frac{(200+250+400)\cdot 10^4}{30\cdot 7\cdot 380}=10{,}1\ мм^2.$$

Выбираем стандартное сечение А16.

Особенности расчета стальных проводов. Сталь — магнитный материал, и поэтому стальные провода обладают большой внутренней индуктивностью. Активное (омическое) сопротивление стальных проводов меняется в зависимости от величины протекающего в них тока. С увеличением тока оно значительно возрастает, так как растут потери на гистерезис (перемагничивание), а также за счет поверхностного эффекта. Величина

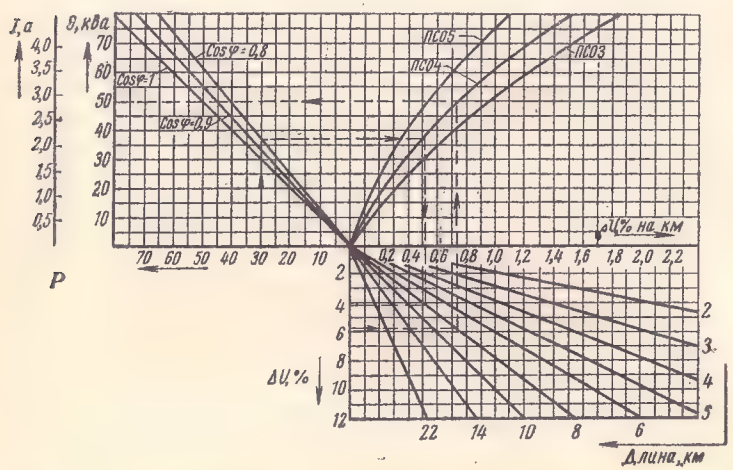


Рис. 215. Номограмма для определения потерь напряжения в трехфазной линии 10 *кв*.

сопротивления стального провода, в зависимости от величины протекающего в проводе тока, дается в справочниках. Методы расчета стальных проводов сложны, поэтому их следует выбирать по таблицам или специальным номограммам, которые составлены и приводятся в справочниках как для стальных, так и для алюминиевых проводов.

На рисунке 215 приведена номограмма для определения потерь напряжения в трехфазных воздушных линиях переменного тока напряжением 10 *кв*. Пользуются номограммой следующим образом. Допустим, необходимо определить потери напряжения $\Delta U\%$ в линии длиной 8 *км*, выполненной проводом ПСО4, если мощность P, которую следует передать, равна 30 *квт*, а cos φ потребителя равен

0,8. В этом случае кажущаяся мощность равна $S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{30}{0{,}8} = 37{,}5$ *ква*. На шкале P находим точку, соответствующую мощности 30 *квт*. Проводим по вертикали линию до пересечения с линией заданного $\cos \varphi$. От точки пересечения проводим горизонтальную линию до пересечения с кривой в правом верхнем углу, соответствующей заданному проводу ПСО4. Из точки пересечения с этой кривой опускаем вертикальную линию до пересечения с прямой, соответствующей заданной длине высоковольтной линии — 8 *км*, и из точки пересечения с ней проводим горизонталь влево, до шкалы $\Delta U\%$, по которой и записываем ответ: около 4%. Ход действий показан на номограмме пунктирной линией со стрелками.

Можно решать задачу по номограмме в обратном порядке. Допустимые потери напряжения равны 6%, расстояние 8 *км*, линия выполнена проводом ПСО4. Требуется определить, какую мощность в *ква* можно передать на данное расстояние по данной линии, не превышая принятые потери напряжения 6%. Решение показано пунктирной линией, которая начинается со шкалы $\Delta U\%$ и заканчивается на шкале S, на цифре 50 *ква*, то есть при заданных условиях передаваемая мощность не должна превышать 50 *ква*.

В справочниках приводятся номограммы для других мощностей, проводов и расстояний.

§ 9. Проверка сети на колебания напряжения при пуске электродвигателей

Сеть проверяют на колебания напряжения при пуске наиболее мощных электродвигателей.

Правила устройства электроустановок допускают отклонение напряжения на зажимах электродвигателя в момент пуска в тех случаях, когда начальный момент рабочей машины не превышает $^1/_3$ номинального момента электродвигателя не более —40% от $U_{ном}$. Таким условиям пуска отвечают все приводы с ременной передачей, а также приводы насосов, вентиляторов и других машин с непосредственным соединением электродвигателя с машиной.

На зажимах любого из других двигателей, работавших в момент пуска данного электродвигателя, снижение напряжения не должно превышать 20% от номинального напряжения сети.

Потеря напряжения в сети при пуске электродвигателя от трансформатора или генератора

$$\Delta U^0/_0 = \frac{Z_c}{Z_c + Z_{эл}} 100, \qquad (216)$$

где Z_c — полное сопротивление сети (*ом*);

$Z_{эл}$ — полное сопротивление короткого замыкания асинхронного электродвигателя, равное

$$Z_{эл} = \frac{U_н}{\sqrt{3} k I_н}; \qquad (217)$$

где $U_н$ — номинальное напряжение электродвигателя (*в*);

k — кратность пускового тока электродвигателя;

$I_н$ — номинальный ток электродвигателя (*а*).

При пуске электродвигателя от сети с трансформатором:

$$Z_c = Z_л + Z_{тр},$$

где $Z_л$ — полное сопротивление линии (*ом*). Оно может быть рассчитано по удельным сопротивлениям, взятым из таблицы:

Марка провода	М10	М16	М25	А16	А25	А35	ПСО5	ПС25	ПС35	ПС50
ом/км	1,88	1,27	0,84	2,0	1,34	1,0	12	6,7	5,4	3,9

$Z_{тр}$ — полное сопротивление короткого замыкания трансформатора

$$Z_{тр} = \frac{e_к{}^0/_0 U_н}{100 \sqrt{3} I_н}; \qquad (218)$$

$e_к{}^0/_0$ — напряжение короткого замыкания трансформатора;

$U_н$; $I_н$ — номинальные напряжение (*в*) и ток трансформатора (*а*).

Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора (*ом*), приведенное к напряжению 380 *в*, равно

Мощность трансформатора (*ква*)	10	20	30	50	100
Полное сопротивление (*ом*) . . .	0,8	0,4	0,265	0,16	0,08

При пуске электродвигателя от сети с синхронным генератором полное сопротивление сети (*ом*)

$$Z_с = Z_л + Z_г,$$

где $Z_г$ — полное сопротивление генератора (*ом*),

$$Z_г = \frac{U_н}{\sqrt{3} I_н О.К.З.};$$

$U_н$ — номинальное напряжение генератора (*в*);
$I_н$ — номинальный ток генератора (*а*);
О.К.З. — отношение короткого замыкания генератора.

Для генератора серии СГ напряжением 400 *в* полное сопротивление (*ом*) равно

Мощность генератора (*ква*) . . .	15	25	35	45	60
Полное сопротивление (*ом*) . . .	9,4	5,75	5,15	4,0	3,15

Пример 3. Электрический двигатель 10 *квт* при напряжении 380 *в* запускается от трансформатора 20 *ква*. Длина линии 1 *км*, провод А25. Определить колебание напряжения при пуске.

1. Полное сопротивление короткого замыкания электродвигателя

$$Z_{эл} = \frac{U_н}{\sqrt{3} k I_н} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 19{,}9} = 2{,}2 \text{ ом},$$

$$I_н = \frac{P_н}{\sqrt{3} U_н \cos\varphi\eta} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38 \cdot 0{,}88 \cdot 0{,}87} = 19{,}9 \text{ а}.$$

Значения k, к. п. д., коэффициента мощности берем из каталожных данных на электродвигатели.

2. Сопротивление трансформатора принимаем по таблице:

$$Z_{тр} = 0{,}4 \text{ ом}.$$

3. Сопротивление линии для А25

$$Z_л = 1{,}34 \text{ ом/км}.$$

4. Потеря напряжения

$$\Delta U^0/_0 = \frac{Z_с}{Z_с + Z_{эл}} 100 = \frac{1{,}34 + 0{,}4}{1{,}34 + 0{,}4 + 2{,}2} 100 = \frac{1{,}74}{3{,}94} 100 = 44^0/_0,$$

что находится в пределах нормы.

Если принять провод А35, имеющий сопротивление 1,0 *ом/км*, то отклонение напряжения на зажимах электродвигателя

$$\Delta U^0/_0 = \frac{1 + 0{,}4}{1 + 0{,}4 + 2{,}2} 100 = \frac{1{,}4}{3{,}6} 100 = 39^0/_0.$$

§ 10. Выбор проводов по механической прочности

Правила устройства электротехнических установок нормируют минимально допустимые диаметры и сечения проводов для воздушных сетей (табл. 32) и внутренних проводов (табл. 33).

При монтаже воздушных линий следует пользоваться монтажными таблицами и по ним выбирать стрелу провеса и величину пролета в зависимости от типа проводов и конструкции опор. К основным параметрам сети относятся: длина пролета линии, габарит провода, то есть расстояние от земли до провода в месте максимального провеса, стрела провеса проводов и высота подвеса у изоляторов.

Таблица 32

Наименьшие диаметры и сечения проводов воздушных сетей

Конструкция проводов	Материал проводов	Классы воздушных линий (см. примечания)		
		I	II	III
Однопроволочные	Медь	Не допускаются	10 *мм²*	6 *мм²*
	Сталь	» »	*ф* 3,5 *мм*	*ф* 3 *мм*
	Алюминий и его сплавы	» »	Не допускаются	16 *мм²*
Многопроволочные	Медь	25 *мм²*	10 *мм²*	6 *мм²*
	Сталь	25 *мм²*	25 *мм²*	25 *мм²*
	Алюминий и его сплавы	35 *мм²*	25 *мм²*	16 *мм²*

Примечания. Класс I — линии от 35 *кв* и выше, кроме неответственных (некоторые сельскохозяйственные) 35 *кв*.

Класс II — линии 35 *кв*, не попавшие в класс I, а также все линии с напряжением от 1 до 20 *кв*.

Класс III — все линии до 1000 *в*.

§ 11. Требования к внутренней проводке

Внутри сельских зданий проводки прокладывают изолированными проводами и кабелями. Только в порядке исключения проводка при напряжении до 1000 *в* внутри здания может быть выполнена голыми проводами. В этом случае они должны быть проложены на высоте не менее 3,5 *м* от пола.

Таблица 33

Наименьшие допустимые сечения проводов в проводках ($мм^2$)

Назначение проводов	Наименьшее сечение проводов		
	медных	алюминиевых	стальных
Провод внутри и снаружи осветительных арматур:			
внутри зданий	0,5	—	—
вне зданий	1,0	—	—
Двухжильные шнуры и провода для подвесных и настольных ламп, а также присоединения подвижных осветительных арматур и переносных бытовых токоприемников	0,75	—	—
Многожильные шнуры, провода и кабели для присоединения в промышленных установках подвижных переносных токоприемников в легком и среднем защитном резиновом, хлорвиниловом и тому подобном шланге	1,5	—	—
То же, в тяжелом шланге	2,5	—	—
Изолированные провода и шнуры для неподвижной прокладки на изолирующих опорах, расположенных друг от друга на расстоянии не более 1 *м*:			
на роликах и клицах	1,0	2,5	—
на изоляторах	1,5	4,0	—
Изолированные провода для неподвижной прокладки на изолирующих опорах, расположенных друг от друга на расстоянии (*м*):			
от 1 до 2	1,5	2,5	—
до 6	2,5	4,0	—
до 12	4,0	6,0	—
свыше 12	6,0	16,0	—
Голые провода в зданиях	2,5	4,0	10
Изолированные и защищенные голые провода в наружных проводках:			
по стенам	2,5	4,0	—
во всех других случаях	4,0	10,0	—
Голые провода в наружных проводках во всех случаях	4,0	16,0	10
Провода для прокладки в трубах	1,0	2,5	—

Выбор марки проводов и способа прокладки в зависи

Наименование и марка проводника	Характер		
	сухие	влажные	сырые
Голая сталь	ФИ, ШП	ФИ, ШП	Н
» медь	ФИ, ШП	ФИ, ШП	ФИ
Голый алюминий	ФИ, ШП	ФИ, ШП	ФИ
ШВРШ, ПРВД	ФР	Н	Н
ТПРФ	СК	Н	Н
ПРВ, АПРВ	ФР, ТИ	ФИ	ФИ
ПР500, АПР500	ФР, ФИ ТС[1], ТИ ТЭ, МР, ПК	ФИ, ТС[1]	ФИ
ПРТО 500, АПРТО500	ТС, МР, ПК	ТС	ТС
ППВ, АППВ	СШ, ОП	СШ, ОП	СШ, ОП
ПВ, АПВ	ФР, ФИ, ТС, СШ, ТИ, ТЭ, МР, ПК	ФИ, ТС, СШ	ФИ, ТС, СШ
АППР, АПН	ОП, ПК	Н	Н
ШРПС	ПП	ПП	ПП
КРПТ	ПП	ПП	ПП
СРГ	СК, КК	СК, КК	СК
АВРГ, АНРБ	СК, КК	СК, КК	СК
АПВГ, АВВГ	СК, КК	СК, КК	СК
АВВБ, АПВБ	Н	Н	Н

[1] Разрешается к прокладке в стальных трубах при отсутствии

Условные обозначения способов прокладки: изоляционных материалов; ФР — на фарфоровых роликах; ШП — в стальных; ТЭ — в трубках эбонитовых (скрытая проводка); СШ — под кладка на скобах; МР — в металлических рукавах; КК — в кабельшеях; ПП — переносная проводка; ОП — открыто по поверхности; Н — прокладка не допускается. Марки проводов и способы про- первую очередь.

Таблица 34

мости от окружающей среды

помещений				Наружные установки
особо сырые	пыльные	с химически активной средой	пожароопасные	
Н ФИ ФИ	ФИ ФИ ФИ	ФИ ФИ ФИ	Н Н Н	ФИ ФИ Н
Н	Н	Н	Н	Н
Н	СК	Н	СК	Н
ФИ	ФИ	Н	Н	ФИ
ФИ	ФИ, ТС[1], МР	ТС[1]	ТИ, МР, ТС[1]	ФИ, ТС[1]
ТС	ТС, МР	ТС	ТС, МР	ТС
Н	СШ, ОП	Н	СШ	Н
ФИ, ТС	ФИ, ТС, МР, СШ	ТС	ТИ, МР, ТС	ФИ, ТС
Н	ОП	Н	Н	Н
ПП	ПП	Н	ПП	Н
ПП	ПП	ПП	ПП	ПП
СК, КК СК, КК СК, КК Н	СК, КК СК, КК СК, КК Н	СК, КК СК СК, КК Н	СК, КК СК, КК СК, КК Н	СК, ТН СК, ТН СК, ТН, ГР ГР

провода марки ПРТО или АПРТО.

ФИ — на фарфоровых изоляторах и клицах из других равноценных открытых, защищенных и закрытых шинопроводах; ТС — в трубах штукатуркой скрыто; ПК — прокладка в коробах и лотках; СК — проных каналах; ТН — в кабельных туннелях; ГР — в грунтовых тран- ТИ — в трубках изоляционных с металлической оболочкой; кладки, заключенные в рамку, рекомендуются к применению в

Внутренние проводки выполняют открытыми — по поверхности стен и потолков, перекрытий и т. д. и скрытыми — под штукатуркой, в полу, в трубах. В тех случаях, когда следует предохранить провода от механических повреждений, применяют деревянные и металлические короба, прокладывают провода в стальных трубах и т. д. В зависимости от характера помещения применяют тот или иной вид проводки (см. табл. 34).

Глава XXI

Монтаж внутренних проводок. Элементы строительства и монтажа воздушных и кабельных линий

§ 1. Исполнение открытых проводок

Монтаж проводок выполняют по проекту, который представляет собой схемы, нанесенные на план здания с указанием расположения ввода, магистральных линий, групповых щитков, типов проводов и способов прокладок, типов выключателей, арматуры и т. д. Магистральные вводы в помещение подключают к групповым щиткам. Все потребители (светильники, бытовые приборы и др.) разбивают на группы таким образом, чтобы общий ток всех токоприемников в группе не превышал 6—15 *а*. На групповом щитке устанавливают предохранители для каждой из групп. На них также размещают выключатели, рубильники и измерительные приборы. В каждой группе должно быть не более 20 светильников, в том числе и штепсельных розеток. Схемы проводок выполняют обычно однолинейными с использованием стандартных условных обозначений.

По исполнению проводки могут быть открытыми и скрытыми. При открытой проводке провода и шнуры прокладывают по стенам и потолку на высоте не ниже 2,5 *м* от пола. Провода при этом стремятся прокладывать на менее освещенной стене, чтобы они не выделялись. Расстояние от провода до стенки или от провода до потолка должно быть не менее 10 *мм*.

Выполнение проводки включает следующие основные операции: разметку мест установки токоприемников, штеп-

сельных розеток и выключателей, разметку мест прокладки проводов по стенам и потолку, разметку мест проходов проводов через стены и междуэтажные перекрытия, разметку мест ответвлений проводов и установки осветительных коробок, установку роликов или изоляторов, прокладку проводов со всеми соединениями и крепление их к изолирующим опорам или закрепление их скобами, оконцевание проводов и присоединение их к токоприемникам.

Установочные материалы (рис. 216) при открытой проводке выбирают по таблице 35.

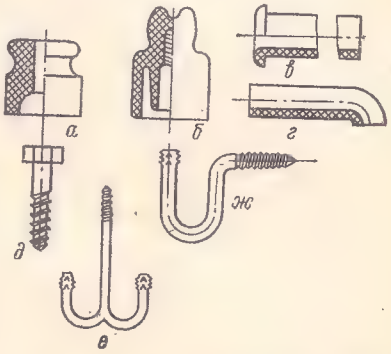


Рис. 216. Установочные материалы:
а — ролик; *б* — изолятор; *в* — втулка; *г* — воронка; *д* — глухарь (винт); *е* — якорь; *ж* — крюк.

Разметку места прокладки проводов делают по уровню и отвесу. Намечают трассы прокладки проводов и мест установки светильников, штепсельных розеток, выключателей, роликов, мест прохода через стены. Разметку начинают от группового щитка или от отдельных помещений с выводами в коридор. Разметку выполняют шнуром или шпагатом, натертым мелом или углем, а в побеленных помещениях — шнуром, протянутым через тряпку с охрой. Последнюю легко затем смахивают со стен и потолка чистой тряпкой.

Центр комнаты при установке светильника определяют на полу при пересечении диагоналей. Затем со стремянки отвесом определяют центр на потолке. Аналогично можно поступить при большом числе светильников с заданным планом их размещения. При разметке и нанесении линий пользуются измерительной рулеткой, а также разметочной рулеткой, выполненной из 2—3-миллиметрового капронового шнура, который при разметке покрывают красителем (синькой, охрой, мелом). Для нанесения вертикальных и горизонтальных линий на стенах и потолках используют разметочный шест. На конце разметочный шест имеет острие, у которого укрепляется разметочный шнурок. Воткнув острие шеста в штукатурку, монтер берет дру-

Таблица 35

Выбор установочных материалов для открытой проводки проводами ПР, АПР, ПВ, АПВ, ПРВД и шнуром ШВРШ

Сечение жил проводов (*мм*²)	Внутренний диаметр изоляционных трубок (*мм*)	Втулки фарфоровые	Воронки фарфоровые	Ролики фарфоровые	Винты по дереву		Изоляторы фарфоровые	Диаметры якорей и полуякорей (*мм*)	Проволока для вязки, диаметр (*мм*)
					диаметр (*мм*)	длина (*мм*)			
Для проводов ПР, АПР, ПВ, АПВ									
1	7	ВФД-7	В-10	РП-2,5	4—5	40	—	—	0,7
1,5	7	ВФД-7	В-10	РП-2,5	4—5	40	ШТЛ-4	9,5	0,7
2,5	7	ВФД-7	В-10	РП-2,5	4—5	40	ШТЛ-4	9,5	0,7
4	7	ВФД-7	В-10	РП-6	4—5	45	ШТЛ-4	9,5	0,7
6	9	ВФД-9	В-16	РП-6	4—5	45	ТФ-4	13	1,0
10	9	ВФД-9	В-16	РП-16	5	60	ТФ-4	16	1,0
16	11	ВФД-11	В-25	РП-16	5	60	ТФ-4	16	1,0
25	13	ВФД-13	В-35	РП-35	6	60	ТФ-3	16	1,4
35	16	ВФД-16	В-70	РП-35	6	60	ТФ-3	16	1,4
50	16	ВФД-16	В-70	РП-70	8	70	ТФ-2	18	1,4
70	23	ВФД-23	В-95	РП-70	8	70	ТФ-2	18	2,0
95	23	ВФД-23	В-95	РП-120	8	80	АИК-1	18	2,0
120	29	ВФД-29	—	РП-120	8	80	АИК-1	18	2,0
Для провода марки ПРВД и шнура марки ШВРШ									
До 1,5	9	ВФД-9	В-16	РШ-4	4	45	—	—	—
2,5	11	ВФД-11	В-35	РП-2,5	4,5	45	—	—	—
4—6	13	ВФД-13	В-35	РП-6	4,5	60	—	—	—

Примечания. 1. ВФД — втулка фарфоровая длинная. 2. Длина винтов приведена для неоштукатуренного дерева. При наличии штукатурки длина винтов должна быть увеличена на толщину штукатурки: 20—30 *мм*.

гой конец разметочного шнурка и, стоя на стремянке, отбивает линию.

Для разметки мест установки роликов или изоляторов применяют разметочный циркуль с деревянными ножками длиной 1,5—2 *м*. Одна ножка имеет острие, а на второй укрепляется карандаш.

Пробивка отверстий и закрепление роликов и изоляторов. Отверстия в кирпичных стенах пробивают вручную шлямбуром и молотком или сверлом и дрелью с ручным или электрическим приводом. Для сверления отверстий в стенах и междуэтажных перекрытиях применяют станки с электродрелью. Для вырезки борозд под скрытую проводку используют электрофрезы и пневматические молотки.

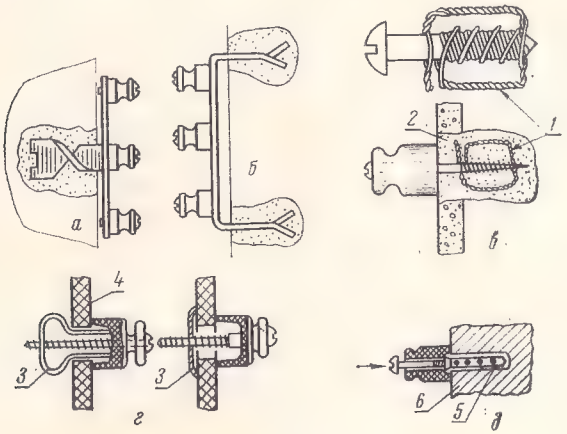


Рис. 217. Крепление роликов:

а — закрепом; *б* — скобой; *в* — проволочной спиралью; *г* — на сухой штукатурке; *д* — с помощью дюбеля или поливинилхлоридовой трубки на кирпичной стене; *1* — спираль; *2* — алебастровый раствор; *3* — пластинка из стали толщиной 0,5 *мм*; *4* — сухая штукатурка; *5* — дюбель или поливинилхлоридовая трубка; *6* — кирпичная стена.

Шлямбуры выполняют из стальных труб диаметром $^1/_2$ — $1^1/_2$″, длиной 500—1500 *мм*. Рубящую часть наваривают «в зуб» и цементируют. На головку шлямбура наваривают отрезок стали в виде конуса острием внутрь трубы.

При установке роликов по деревянным стенам их закрепляют шурупами с полукруглой головкой (ролики

РП-2 и РП-6) или глухарями (ролики РП-16, РП-35, РП-70, РП-120). Под головку глухаря при этом прокладывают картонную (на ролик) и стальную (на картонную) шайбы. Первая смягчает давление на ролик, а вторая предохраняет первую от разрывов.

При установке нескольких роликов в ряд на оштукатуренных стенах и потолках под ролики прокладывают стальную полоску — планку, назначение которой — предохранить штукатурку от разрушения.

На кирпичных и бетонных стенах ролики укрепляют на закрепах или скобах (рис. 217). Ролики прикрепляют к закрепу или скобе винтами или болтами. Скобы и закрепы вмазывают в отверстия, выбитые в стене, алебастровым или цементным раствором. Ролики могут быть также установлены с помощью проволочной спирали. Спираль выполняют из оцинкованной вязальной проволоки диаметром 0,5—0,8 *мм*. Отверстие для спирали, пробитое в стене, заполняют алебастровым раствором и вводят в него шуруп со спиралью. По мере схватывания раствора шуруп вывертывают, а затем устанавливают ролик. Такой способ рекомендуется для проводов сечением до 2,5 *мм*². Для проводов больших сечений ролики устанавливают на закрепах и скобах.

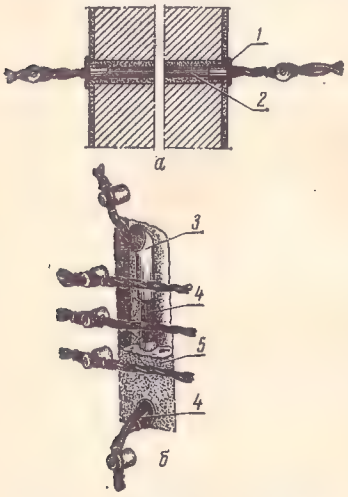


Рис. 218. Устройство проходов (*а*) и обходов (*б*) при прокладке провода ПРВД:
1— втулка; *2* и *4*— резиновые трубки; *3*— воронка; *5*— алебастровый раствор.

Изоляторы устанавливают на крюках, якорях, полуякорях, штырях вертикально. При большом числе изоляторов их устанавливают на скобах, которые укрепляют в гнездах, в стенах или на потолке алебастровым раствором (в кирпичных стенах) или цементным раствором (в бетонных стенах). Для закрепления изолятора на крюке или якоре на стержень с заусеницами наматывают паклю, а затем навинчивают изолятор. Небольшие

изоляторы укрепляют специально приготовленными для этой цели замазками (сера+песок или портланд-цемент+ +фарфоровая крошка и т. д.).

Устройство проходов и борозд. Проходы через стены и междуэтажные перекрытия выполняют в изоляционных трубках. На выходе на трубки надевают фарфоровые воронки (в сырых помещениях) или втулки (в сухих помещениях). В стену их вмазывают алебастровым раствором (рис. 218). Каждый провод ПР при этом заключают в отдельную изоляционную трубку. Провод марки ПРВД (обе жилы) при проходе через стену разрешается прокладывать в одной трубке.

В бороздах провода прокладывают при обходах препятствий (рис. 218, *б*).

Воронки должны выступать над поверхностью стены при укладке проводов в бороздах на 2—3 *мм*. При проходе через стену отверстие воронки должно смотреть вниз.

§ 2. Скрытые проводки

Скрытые проводки обычно выполняют под штукатуркой. Провода при этом прокладывают в стальных трубах или в полутвердых (резиновых, хлорвиниловых и др.) трубках. Полутвердые трубки укладывают под слоем штукатурки, а не в самом слое. В одной трубке прокладывается не более четырех проводов марки ПР500. Радиус изгиба трубок на поворотах должен быть не менее десяти внутренних диаметров. В местах изгиба на трубки наматывают прорезиненную ленту, а поверх навивают спираль из стальной оцинкованной проволоки диаметром 1,5 *мм*. Ответвления и соединения проводов выполняют в ответвительных коробках из изолирующего материала, которые устанавливают таким образом, чтобы крышка была в одной плоскости с поверхностью стены.

Полутвердые трубки соединяют отрезком трубки большего диаметра длиной 100—150 *мм*, который надвигают сверху в месте стыка соединяемых трубок. Поверх отрезка трубки наносят слой горячей заливочной массы и обматывают прорезиненной лентой.

Полутвердые трубки укладывают в каналы, выбитые в стене. Затем помещение штукатурят. После высыхания заштукатуренных каналов и выветривания влаги из трубок (7—10 дней) в трубки вдувают тальк и затяги-

вают провода (стальной оцинкованной проволокой диаметром 1,4 *мм*). Диаметр трубок выбирают в зависимости от сечения проводов и их числа (табл. 36).

Таблица 36

Выбор диаметра резиновых полутвердых трубок

Сечение жилы провода (*мм*²)	Количество проводов в одной трубке		
	1	2	3 или 4
	Внутренний диаметр трубок (*мм*)		
1,0	9	11	16
1,5	9	11	16
2,5	11	13	16
4,0	11	16	23
6,0	13	16	23
10,0	16	23	29
16,0	16	23	29
25,0	16	29	36
35,0	16	29	—
50,0	23	36	—
70,0	29	—	—
95,0	29	—	—
120,0	36	—	—

Проводка может быть также выполнена поверх штукатурки, в стальных трубах. Проводку в стальных трубах применяют для защиты проводов от механических и химических повреждений. При этом используют нормальные водогазопроводные или электросварные трубы. При поворотах радиус изгиба труб равен шести наружным диаметрам трубы. Тройники и угольники в этом случае не применяют, так как при протаскивании проводов будет повреждена изоляция. Трубы хорошо очищают от ржавчины снаружи (металлической щеткой) и внутри (металлическими ершами). На концах труб удаляют заусеницы. Крепят трубы к стенам и потолку скобами через 2,5—3,5 *м*, в зависимости от диаметра труб. Все соединения и ответвления выполняют только в соединительных или ответвительных коробках, которые должны иметь хороший доступ для осмотра. Перед протягиванием проводов в трубы вдувают тальк. Диаметр труб выбирают в зависимости от числа проводов и их сечения (табл. 37).

При прокладке одного провода в трубе в цепи переменного тока труба будет нагреваться вихревыми тока-

Таблица 37

Выбор газопроводных и электросварных труб в зависимости от числа прокладываемых одножильных проводов ПРТО, АПРТО, ПР, АПР, ПВ и АПВ

Сечение провода ($мм^2$)	Число проводов при размере труб							
	1/2″	3/4″	1″	1 1/2″	1 1/2″	2″	2 1/2″	3″
	18 *мм*	24 *мм*	33 *мм*		44,5 *мм*	60 *мм*		
1,5	4—6	8—12	13—19	24—34	31—45	—	—	—
2,5	3—5	7—10	11—16	20—28	26—37	44—62	—	—
4	3—4	6—8	9—13	17—23	22—31	37—52	—	—
6	2—3	4—6	7—11	14—19	18—25	30—43	—	—
10	1	2—3	3—5	6—9	9—12	15—21	—	—
16	1	1	2—4	5—7	6—9	11—15	18—26	—
25	0—1	1	1—2	3—5	4—6	7—10	12—18	—
35	0—1	1	1	2—4	3—5	6—8	10—14	—
50	—	0—1	1	1—3	2—3	4—6	7—10	10—15
70	—	0—1	0—1	1	1	3—4	5—7	7—10
95	—	—	0—1	1	1	1—3	3—4	4—6
120	—	—	—	1	1	1	3—4	4—6

Примечания. Число проводов в трубе зависит от сложности затяжки проводов в трубопровод. Меньшее число из указанных для каждого случая рассчитано для трубопроводов длиной от 30 *м* при четырех изгибах до 100 *м* при отсутствии изгибов. Большее число предназначено для трубопроводов от 10 *м* при четырех изгибах до 50 *м* при отсутствии изгибов. Двух-, трех- и четырехжильные провода марки ПРТО можно рассматривать как 2,3 или 4 одножильных провода того же сечения.

Размеры труб в дюймах (″) указаны для водогазопроводных труб, в *мм* — для электросварных (тонкостенных стальных).

ми и из-за потерь на перемагничивание. Поэтому плавкая вставка предохранителя должна быть рассчитана на ток не больше 25 *а*. При большем токе труба нагревается до недопустимой температуры.

Скрытая проводка безопасна в пожарном отношении, так как она расположена в толще несгораемого материала (при прокладке под штукатуркой на деревянной стене под провода подкладывают слой асбеста 3 *мм*) и доступ воздуха к ней затруднен. Она безопаснее также и с точки зрения поражения людей током. Такую проводку можно проложить по наикратчайшему пути, что дает экономию проводов по сравнению с открытой проводкой. Механические повреждения скрытой проводки

ограничены. Действие солнечных лучей, пыли, газов на изоляцию исключается. Основной недостаток — невозможность без переделки присоединять новые токоприемники.

§ 3. Соединение, ответвление и оконцевание проводов

Медные жилы проводов соединяют скруткой с последующей сваркой или пайкой, а также при помощи механических зажимов опрессованием. На рисунке 219 представлен паяльно-сварочный трансформатор типа ТПС-2000, предназначенный для контактного электроразогрева металлов при сварке и пайке соединений установочных проводов, кабеля, обмоток электрических машин, трансформаторов и др. Первичная обмотка трансформатора может быть включена в сеть 380 или 220 *в*, вторичное напряжение определяется числом рабочих витков сварочных клещей (от 1 до 8 витков). Мощность трансформатора 2 *ква*, при максимальном вторичном токе 250 *а*, длительность рабочего периода около 0,5 *мин*.

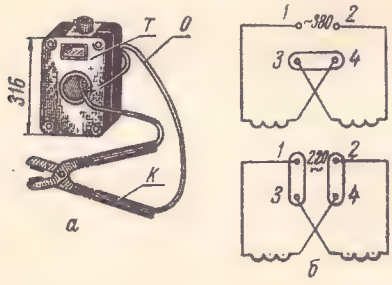


Рис. 219. Паяльно-сварочный трансформатор ТПС-2000:

а — общий вид; *б* — схема; *Т* — трансформатор; *О* — гибкий кабель для создания вторичной обмотки; *К* — паяльно-сварочные клещи для сварки и пайки проводов сечением от 2,5 до 200 *мм*².

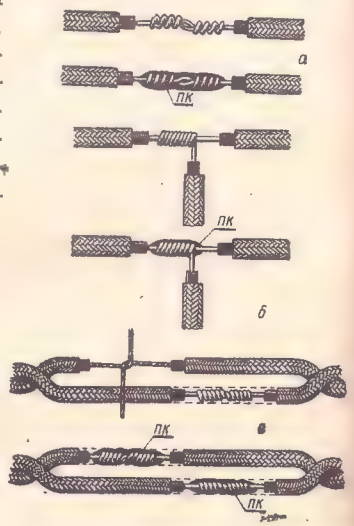


Рис. 220. Соединение скруткой с последующей пайкой:

а — проводов ПР и АПР; *б* — ответвление проводов ПР и АПР; *в* — проводов ПРВД; *ПК* — место пайки.

Медные однопроволочные провода сечением до 6 *мм*^{2}, а также многопроволочные небольших сечений паяют по скрутке (рис. 220). Жилы сечением 6—10 *мм*^{2} соединяют бандажной пайкой (рис. 221, *а*), а многопроволочные провода соединяют скруткой с предварительной расплеткой

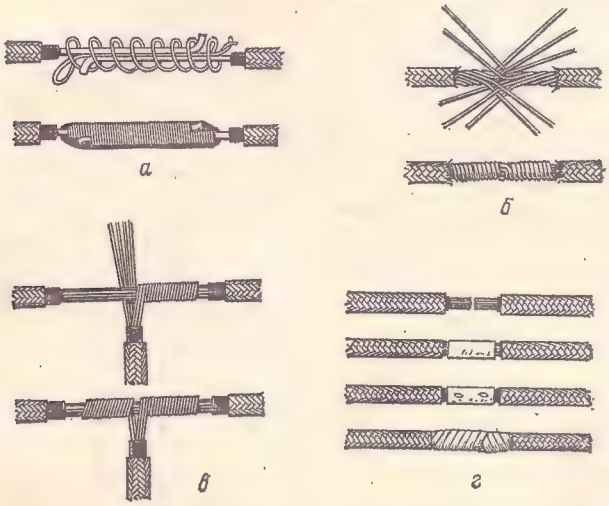


Рис. 221. Соединение и ответвление проводов:
а — однопроволочных бандажной пайкой; *б* — многопроволочных скруткой; *в* — ответвление многопроволочных проводов; *г* — соединение многопроволочных проводов опрессованием.

проволок (рис. 221, *б*). Места соединений скруткой или бандажной пайкой должны быть длиной не менее 10—15 наружных диаметров соединяемых жил.

Паяют свинцово-оловянистым припоем с использованием канифоли в качестве флюса. Применять кислоту при пайке медных проводов, а также нашатырь не разрешается, так как в дальнейшем провода разрушаются в месте спайки.

В настоящее время широко используется метод соединения медных проводов опрессованием (рис. 221, *г*). Концы проводов зачищают на 25—30 *мм*, затем оберты-вают медной фольгой и опрессовывают специальными клещами типа ПК.

Алюминиевые жилы проводов соединяют сваркой, пайкой и механическим путем. Сварку выполняют при

помощи угольных электродов от сварочного трансформатора в специальной металлической формочке (рис. 222, *а* и *б*).

Для пайки алюминиевые провода скручивают (222, *в*). Затем место скрутки нагревают в пламени паяльной лампы и пропаивают припоем, состоящим из олова (42—40%), цинка (58,5—56%) и меди (2—1,5% по весу).

Все ответвления проводов марки ПРВД выполняют у роликов с дальнейшим подвязыванием в месте ответвления (рис. 223).

Оконцевание проводов выполняют после их прокладки. Однопроволочные провода сечением до 10 *мм*² и многопроволочные сечением до 2,5 *мм*² присоединяют к токоприемникам непосредственно. Оголенную жилу при этом вводят под зажимной контактный винт. Концы

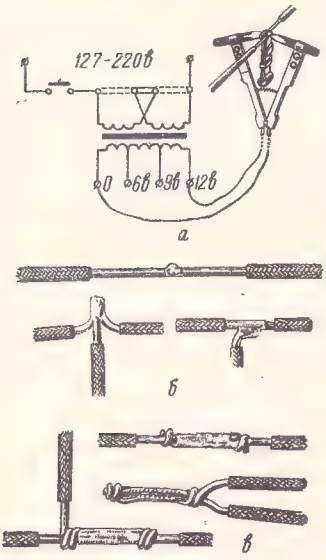


Рис. 222. Соединение проводов сваркой и пайкой:
а — соединение однопроволочных алюминиевых проводов сваркой в гильзе; *б* — образцы сварок; *в* — соединение пайкой.

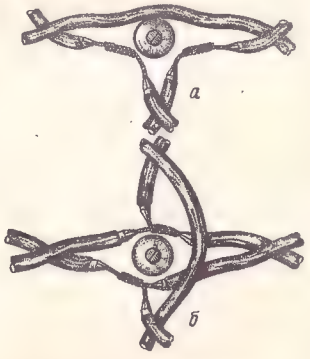


Рис. 223. Ответвление провода ПРВД:
а — к выключателю; *б* — к выключателю и лампе.

многопроволочных проводов скручивают и пропаивают. В зависимости от типа контакта на токоприемнике конец провода может быть в виде пестика (рис. 224, *а*) или колечка (рис. 224, *б*). Концы однопроволочных проводов сечением более 10 *мм*² или многопроволочных сечением более

2,5 *мм*² снабжают наконечниками (рис. 224, *в*), которые припаивают или приваривают к жиле, а в некоторых случаях — опрессовывают.

Во всех случаях соединения, ответвления и оконцевания проводов места соединения их между собой и наконечником обматывают изоляционной лентой в несколько слоев. В соответствии с Правилами электрическая прочность изоляции в месте соединения или ответвления должна быть такой же, как и прочность целой изоляции.

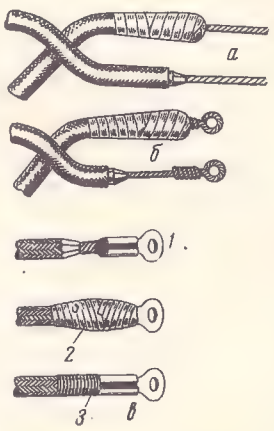


Рис. 224. Оконцевание проводов:

а — пестом; *б* — колечком; *в* — припайкой наконечника; *1* — наконечник; *2* и *3* — изоляционная лента или бандажная нить.

§ 4. Прокладка и крепление проводов

Провод к месту монтажа доставляют в бухтах. При разматывании его следует избегать образования «барашков». В дальнейшем в месте возникновения барашка может повредиться изоляция или вследствие излома жилы произойдет перегрев.

Провод отмеривают по разметке, привязывают на крайнем ролике, натягивают и намечают ответвления. После этого провод снимают, выполняют ответвления способами, указанными выше, и снова натягивают и привязывают на втором крайнем ролике. Перед натяжкой и привязкой провод выпрямляют, проглаживая его в тряпке, пропитанной парафином.

Места, где привязывают провод, обматывают изоляционной лентой. Вязку осуществляют оцинкованной проволокой. На рисунке 225, *а* показаны способы крепления проводов к роликам. Шнуры к роликам крепят хлопчатобумажной тесьмой. К изоляторам провод крепят к шейке или головке изолятора (рис. 235, стр. 433).

Рекомендуемые расстояния между роликами следующие: провод ПР, вертикальная прокладка — 700 *мм*, горизотальная прокладка — 600 *мм*; шнур, вертикальная прокладка — 800 *мм*, горизонтальная прокладка —

700 *мм*. Рекомендуемые расстояния между проводами, прокладываемыми параллельно на роликах, даны в таблице 38, а расстояния между изоляторами по длине и по ширине линии — в таблице 39.

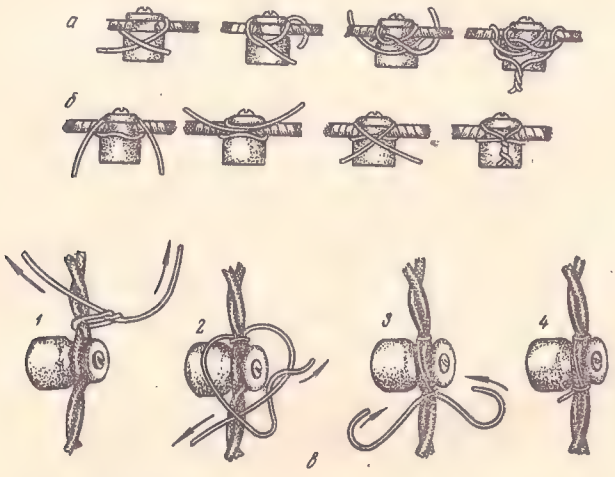


Рис. 225. Крепление проводов ПР на роликах проволокой с подмоткой прорезиненной лентой:
а — хомутом; *б* — крестом; *в* — крепление провода ПРВД вязкой.

Таблица 38

Рекомендуемые расстояния между изолированными проводами при прокладке их параллельно на роликах

Марка провода	Сечение жилы провода или шнура (*мм*²)	Расстояние между проводами (*мм*)
ПР	1—4	35
	6—10	50
	16—25	50
	35—70	70
ПРВД, ШВРШ	1—2,5	35
	4—6	50

Таблица 39

Рекомендуемые расстояния между изоляторами при параллельной прокладке изолированных проводов

Расстояния между центрами опор (*мм*)	Расстояния (*мм*) при сечении проводов (*мм*²)				
	1,5—2,5	4—10	16—25	35—70	95—120
Наименьшие расстояния по ширине линии	70	70	100	150	150
Наибольшие расстояния по длине линии	2000	2500	3000	6000	6000

Провода, прокладываемые по стене, должны отстоять от потолка не менее чем на двойную высоту ролика или изолятора, а провода, прокладываемые по потолку, должны отстоять от стены не менее чем на двойную высоту ролика или изолятора.

Особенности прокладки проводов марок ППВ, АППВ и АПН. Их разрешается применять для групповых (распределительных) осветительных линий и мелких силовых нагрузок (до 1 *квт*) в сетях напряжением до 380 *в* переменного и постоянного тока. Провода этих марок разрешается прокладывать в сухих и сырых помещениях — жилых, административных, лечебных, учебных, детских, производственных (промышленных, сельскохозяйственных, транспортных), общественных зданиях, а также в зрелищных предприятиях, дворцах культуры, клубах (кроме сцен и зрительных залов), в том числе в кухнях, санузлах, на лестничных клетках, чердаках, в подвалах.

Скрыто проводка выполняется под слоем штукатурки или внутри стен и перекрытий без труб. Открыто — непосредственно по поверхности несгораемых стен и потолков без дополнительной изоляции. Провода с изоляцией из несветостойкого пластиката (Р-38— прозрачный пластикат желто-коричневого оттенка) допускается применять только для скрытой прокладки. Нельзя прокладывать эти провода открыто в пожароопасных помещениях, на чердаках, а также открыто или скрыто во взрывоопасных помещениях, особо сырых, в помещениях с активной агрессивной средой, по деревянным основаниям — в детских и

лечебных учреждениях, зрелищных предприятиях, дворцах культуры, клубах. Не допускается также заряжать ими осветительную арматуру.

Открытую прокладку можно выполнять: а) непосредственно по стенам и перекрытиям, покрытым сухой гипсовой или мокрой штукатуркой; б) по несгораемым стенам и перегородкам, обклеенным обоями, непосредственно поверх обоев. По деревянным стенам, перегородкам и потолкам открытую прокладку проводов, как правило, не делают; в случае необходимости ее выполняют по слою листового асбеста толщиной не менее 3 *мм*.

Скрытую проводку можно вести: а) по несгораемым стенам и перегородкам, подлежащим затирке или покрываемым мокрой штукатуркой, в пустотах, в заштукатуриваемой борозде или под слоем мокрой штукатурки; б) по деревянным, покрываемым мокрой штукатуркой стенам и перегородкам под слоем штукатурки с подкладкой под провода слоя листового асбеста или по намету штукатурки толщиной не менее 5 *мм*, при этом асбест или намет штукатурки укладывают поверх дранки или вырезают участок дранки, соответствующий площади асбестовой полосы; в) по деревянным покрываемым сухой гипсовой штукатуркой стенам и перегородкам — в зазор между стеной и штукатуркой в сплошном слое алебастрового намета или между двумя слоями листового асбеста толщиной не менее 3 *мм*; слой алебастрового намета с каждой стороны провода должен быть не менее 5 *мм*.

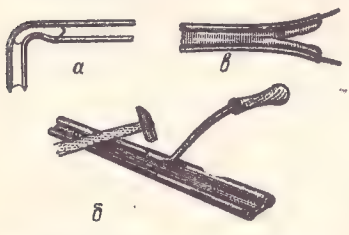


Рис. 226. Элементы прокладки провода ППВ и АППВ:
а — поворот; *б* — забивка гвоздей в перепонку; *в* — разделка концов для ввода в выключатель.

Радиус закруглений проводов ППВ должен быть в 5—6 раз больше его ширины. Крепится провод ППВ гвоздями длиной 20—25 *мм* со шляпкой диаметром до 3 *мм*. Провод можно также приклеивать к стенам (25% полихлорвиниловой смолы, 75% дихлорэтана). В междуэтажных перекрытиях провод прокладывают в трубах, при обходах — в открытых оштукатуренных бороздках.

Ответвления выполняют в коробках. На изгибах перепонку вырезают (рис. 226, *а*). Гвозди в перепонку сна-

чала забивают непосредственно молотком, а затем через оправку (рис. 226, *б*). При вводе в штепсельную розетку или выключатель (рис. 226, *в*) перепонку вырезают на длину 40—50 *мм*.

Особенности прокладки кабелей АНРГ, АПВГ, АВРГ и аналогичных им. Эти кабели используют для проводок в сухих, сырых и особо сырых помещениях. Кабель крепят скобами. Расстояние между скобами при горизонтальной прокладке до 300 *мм*, при вертикальной прокладке до 400 *мм*. При прокладке по потолку расстояние между скобами до 250 *мм*. Радиус изгиба не менее 6—8 наружных диаметров кабеля. Скобы укрепляют шурупами при помощи спиралей из проволоки или хлорвиниловых трубок.

Соединения и ответвления выполняют в коробках. Для того чтобы не нарушалась герметичность, используют сальниковые уплотнения в патрубках коробки. Через стенку кабели можно прокладывать в полутвердых трубках с втулками по концам.

Особенности прокладки провода типа ТПРФ. Этот провод используется в сухих нормальных помещениях при напряжении до 500 *в*. Кре-

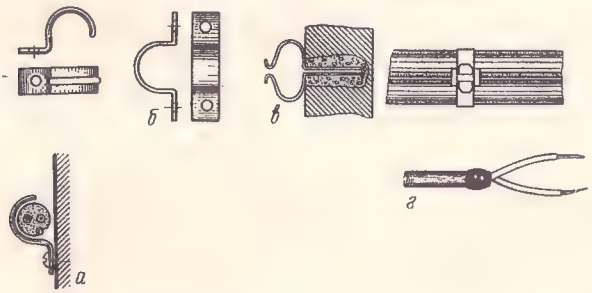


Рис. 227. Элементы прокладки провода ТПРФ:
а и *б* — скобы и их использование; *в* — усы; *г* — разделка концов.

пят его скобами, при помощи перфорированной ленты с кнопками, полосками с пряжками, или на «усах». Расстояние между местами креплений не должно превышать 500 *мм*. Ответвления делают в ответвительных коробках. На рисунке 227 показаны элементы проводки проводом ТПРФ. Скобы могут быть одно- (*а*) и двухлапчатыми (*б*).

Усы изготавливают из жести или алюминия толщиной 1—1,5 *мм*, шириной 5—6 *мм* (*в*). Их вмазывают в гнезда в стене алебастровым или цементным раствором. Изгибают провод специальными гибочными клещами. Радиус изгиба берут равным шести наружным диаметрам провода, не менее. Обходы выполняют в открытых бороздах. При разделке провода (*г*) необходимо, чтобы оболочка входила в ответвительную коробку на 3—4 *мм*. Разделанный конец провода укрепляют бандажом из суровой нитки или липкой ленты. Бандаж накладывают на конец трубки общей шириной 8—10 *мм*. После наложения бандажа на поясную изоляцию провода вводят его концы в коробку и выполняют ответвление.

Способы прокладки проводов и кабелей, применяемые в зависимости от характеристики окружающей среды, приведены в таблице 40.

§ 5. Установка осветительной арматуры, выключателей и групповых щитков

Светильники выбирают в соответствии с характером помещения. На рисунке 228, *а* показана установка светильника при проводке на изоляторах. При проводках на роликах светильники монтируют свисающими на шнурах, проходящих через фарфоровые потолочные розетки (рис. 228, *б*). При проводках кабелями применяют влагозащищенные пыленепроницаемые светильники. Кабели вводят в них при помощи бюгелей с сальниками. В выключатели, штепсельные розетки и другие аппараты кабели вводят снизу через патрубки с сальниками и устанавливают их на выносных скобах.

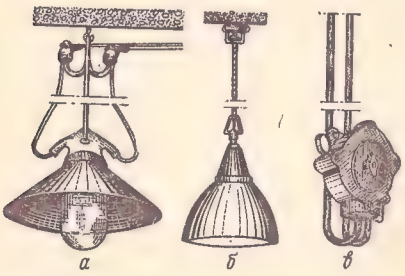


Рис. 228. Установка:
а и *б* — осветительной арматуры; *в* — выключателя.

В сухих помещениях выключатели и штепсельные розетки, а также настенные патроны устанавливают на деревянных розетках диаметром 60—70 *мм* и крепят к ним шурупами. Деревянную розетку

Таблица 40

Виды электропроводки и способы прокладки проводов и кабелей, применяемые в зависимости от характеристики окружающей среды

Характеристика помещения	Вид электропроводки	Способы выполнения
Сухое (относительная влажность не превышает 60%)	Открытая	а) непосредственно по несгораемым и трудносгораемым конструкциям и поверхностям: на роликах и изоляторах, в трубах (изоляционных с металлической оболочкой, стальных), коробах, лотках, гибких металлических рукавах, а также кабелями, защищенными и специальными проводами
		б) непосредственно по сгораемым конструкциям и поверхностям: на роликах и изоляторах, в трубах (изоляционных с металлической оболочкой, стальных), коробах, лотках, гибких металлических рукавах, а также кабелями и защищенными проводами
	Скрытая	в) в трубах (изоляционных, изоляционных с металлической оболочкой, стальных), глухих коробах, замкнутых каналах строительных конструкций зданий, а также специальными проводами
Влажное (пары или конденсирующаяся влага выделяются лишь временно, в небольших количествах; относительная влажность более 60%, но не превышает 75%)	Открытая	а) непосредственно по несгораемым и трудносгораемым конструкциям и поверхностям: на роликах и изоляторах, в стальных трубах и коробах, а также кабелями, защищенными и специальными проводами
		б) непосредственно по сгораемым конструкциям и поверхностям: на роликах и изоляторах, в стальных трубах и коробах, а также кабелями и защищенными проводами

Продолжение

Характеристика помещения	Вид электропроводки	Способы выполнения
	Скрытая	в) в трубах (изоляционных влагостойких, стальных), глухих коробах, а также специальными проводами
Сырое и особо сырое (сырое помещение — когда относительная влажность длительно держится на уровне более 75%; особо сырое — влажность близка к 100%, потолок, стены, пол и предметы покрыты влагой)	Открытая	а) непосредственно по несгораемым и сгораемым конструкциям и поверхностям: на роликах для сырых мест и изоляторах, в стальных трубах, а также кабелями
	Скрытая	б) в трубах (изоляционных влагостойких, стальных)
Жаркое (температура длительно превышает +30°)	Открытая	а) непосредственно по несгораемым и сгораемым конструкциям и поверхностям: на роликах и изоляторах, в стальных трубах, коробах, лотках, а также кабелями и защищенными проводами
	Скрытая	б) в трубах (изоляционных, изоляционных с металлической оболочкой, стальных)
Пыльное (выделяется технологическая пыль, которая может оседать на проводах, проникать внутрь машин, аппаратов)	Открытая	а) непосредственно по несгораемым и трудносгораемым конструкциям и поверхностям: на изоляторах, в трубах (изоляционных с металлической оболочкой, стальных), коробах, а также кабелями и защищенными проводами
		б) непосредственно по сгораемым конструкциям и поверхностям: в стальных трубах, коробах, а также кабелями и защищенными проводами
	Скрытая	в) в трубах (изоляционных, изоляционных с металлической оболочкой, стальных), коробах, а также специальными проводами

Химически активная среда (длительно держатся пары, разрушающие изоляцию и токоведущие части оборудования)	Открытая	а) непосредственно по несгораемым и сгораемым конструкциям и поверхностям: на изоляторах, в стальных трубах, а также кабелями
	Скрытая	б) в стальных и изоляционных трубах
Наружная электропроводка	Открытая	а) на изоляторах, в стальных трубах, кабелями, а также на роликах (см. II-1-64)
	Скрытая	б) в стальных трубах, специальными проводами
Взрывоопасные (установки, в которых могут образоваться взрывоопасные смеси горючих газов или паров с воздухом, кислородом и другими окислителями)	Открытая	а) вне взрывоопасных помещений, по внешним стенам; бронированным, без наружных покровов кабелем
	Скрытая	б) в трубах, но с минимально возможным числом ответвительных и соединительных коробок, взрывонепроницаемого, взрывобезопасного или пыленепроницаемого исполнения (в зависимости от характера взрывоопасной среды — см. ПУЭ)
Пожароопасные установки, в которых применяются или хранятся горючие вещества; минеральные масла (П-I); деревообделочные цеха, мельницы, элеваторы (П-II); склады угля, торфа, дерева (П-III)	Открытая	а) изолированными проводами на изоляторах; небронированным кабелем в свинцовой или полихлорвиниловой оболочке; переносная прокладка шланговыми кабелями и проводами
	Скрытая	б) в трубах

к стене привинчивают одним центральным шурупом. В сырых помещениях, а также снаружи полугерметические выключатели укрепляют на роликах или непосредственно на стене. Выключатели устанавливают на стене на высоте 1,5—1,7 *м*, а штепсельные розетки — на высоте 0,8—1,2 *м*.

Осветительную арматуру весом более 1 *кг* подвешивают к потолку на стальной проволоке диаметром 1—1,5 *мм*.

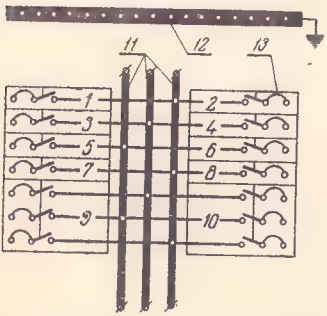


Рис. 229. Схема осветительного щитка СУ-9400 с восемью (*1—8*) однополюсными установочными автоматами А3100 и двумя (*9* и *10*) трехполюсными; *11*— линейные шины; *12* — нулевая шина; *13*— нагревательные элементы токовых расцепителей.

Щитки с предохранителями закрепляют на высоте 2,5—3 *м* от пола. Если на щитке ставят выключатели и рубильники, то высота их установки 1,5—1,7 *м*. Щитки выполняют на мраморных, асбоцементных, деревянных панелях, устанавливаемых на стене при помощи металлических каркасов. Для групповых щитков освещения в последнее время вместо предохранителей применяют автоматы типа *А*, рассчитанные на токи от 6 *а* и выше. Широко применяются комплектные осветительные щиты. Групповые осветительные щитки серии СУ-9400 выполняют со встроенными в них установочными автоматическими выключателями типов А3161 и А3163. Эти щитки предназначены для защиты осветительных установок от перегрузок и коротких замыканий и нечастых оперативных включений и отключений. Число встроенных в щиток выключателей может быть от 2 до 30. Расцепители выбирают на токи 15, 20, 30, 40, 50 *а*. Максимальная нагрузка на главные шины — до 150 *а* (рис. 229).

В квартирах или домах колхозников устанавливают квартирные щитки, на которых размещают: счетчик, предохранители, бытовой автомат типа АБ-25 или пробку-автомат.

§ 6. Проводки вне помещений и вводы. Заземления в проводках

Проводки вне помещений прокладывают вдоль наружных стен зданий. Изолированные провода разрешается прокладывать на высоте 2,5 *м* от земли. Изоляторы укрепляют на крюках, заделываемых в гнезда цементным раствором. Обходы водосточных труб выполняют в полутвердых трубках с воронками по концам, в бороздах в стенах.

Ответвления от воздушных линий к вводам в дома следует выполнять голым проводом. При выполнении ответвлений изолированным проводом изоляция быстро разрушается.

Воздушные вводы в здания нельзя выполнять однопроволочным алюминиевым проводом (голым и изолированным), так как он обладает незначительной механической прочностью. Провод прокладывают в полутвердой трубке с оконцеванием воронкой снаружи и втулкой или

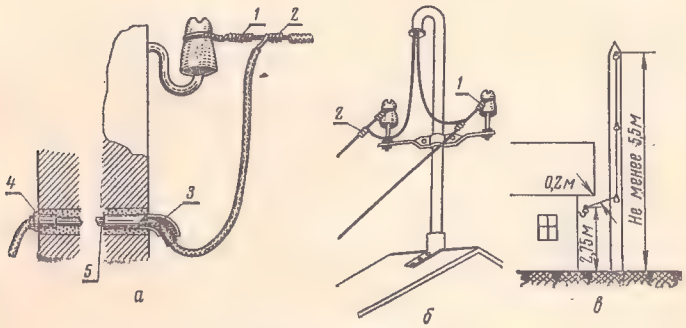


Рис. 230. Выполнение вводов в помещение:
а — через стенку; *б* — через крышу; *в* — через стену в низкое помещение; *1* — заглушка; *2* — скрутка; *3* — воронка; *4* — втулка; *5* — резиновая трубка.

воронкой изнутри (рис. 230). Вблизи от ввода устанавливают изолятор, на котором провод со столба укрепляют заглушкой. Изолированный провод ввода соединяют с линейным проводом скруткой. Отверстие для проводов ввода может быть общим, но прокладывают их в отдельных трубках. Расстояние низшей точки подвеса линейных проводов от земли должно быть не меньше 2,75 *м*.

Расстояние между проводами и выступающими частями зданий должно быть не менее 20 *см*. Вводы до 25 *м* длиной выполняют проводом сечением не менее М4 или А10. При пролетах более 25 *м* сечения должны быть не менее М6, А16. Отверстие воронки заливают изоляционной массой.

Вводы в низкие дома выполняют через крышу в стальных трубах (рис. 230, *б*). Расстояние от проводов до крыши не должно быть менее 2 *м*. Стальную трубу соединяют с заземленным нулевым проводом.

В ряде случаев вводы в низкие помещения целесообразно выполнять с подставного столба, как показано на рисунке 230, *в*.

Спуск по столбу в этом случае можно выполнить на изоляторах или, что лучше, в стальной трубке изолированным проводом.

Вместо квартирного щитка на фазных проводах вводов на ближайшем к вводу столбе можно устанавливать грибообразные предохранители, которые допускают смену плавкой вставки под напряжением.

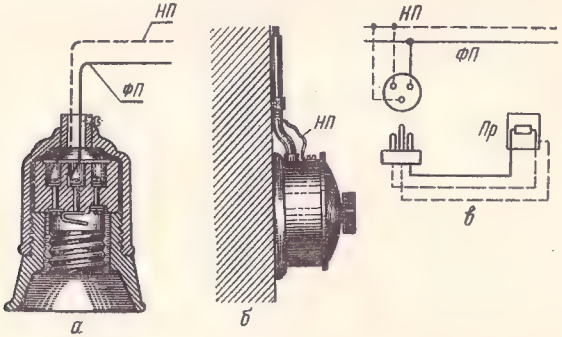


Рис. 231. Присоединение к нулевому проводу:
а — металлического патрона; *б* — корпуса выключателя; *в* — корпуса прибора; *ФП* — фазный провод; *НП* — нулевой провод; *Пр* — прибор.

Для заземления станин станков, корпусов электродвигателей, металлических частей арматуры, металлических корпусов выключателей и т. д. используют нулевой провод. На рисунке 231 показано, как следует присоединять металлический патрон и корпус выключателя к нулевому проводу. С нулевым проводом соединяют также тру-

бы, свинцовые оболочки кабелей, металлические крышки групповых щитков и другие металлические части проводок.

Если токоприемник имеет металлический корпус и соединяется с сетью при помощи штепсельной розетки, то штепсельная розетка должна иметь третий стержень, который несколько длиннее двух остальных (рис. 231, *в*). С этим стержнем соединяют корпус токоприемника. Этот стержень первым входит в соединение с заземленным проводом.

§ 7. Схемы осветительных цепей

На рисунке 232, *а* представлена схема электрической проводки в трехкомнатном помещении. В комнате *I* установлены две электрические лампочки, которые одновременно включаются и выключаются общим выключателем. Принципиальная схема проводки в комнате *I* пред-

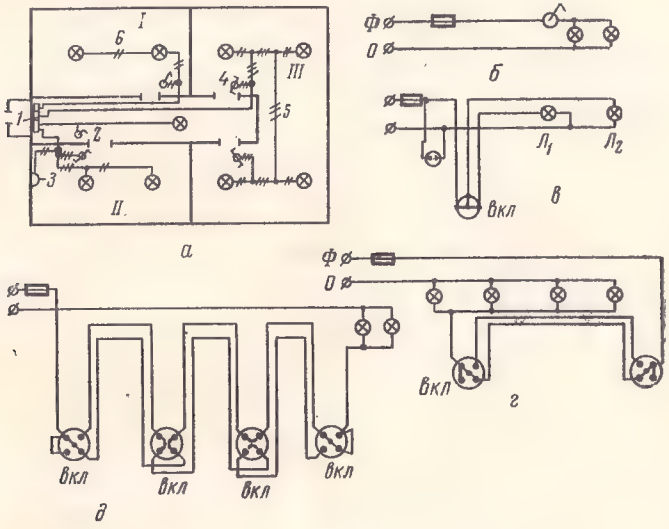


Рис. 232. Схемы осветительных проводок:

а — план трехкомнатного помещения с осветительными проводками; *б* — одновременное включение и выключение ламп; *в* — схема с выключателем на 4 положения (можно включить одну или другую лампы или обе вместе); *г* — схема с включением и выключением ламп из двух мест; *д* — включение ламп более чем из двух мест; *1* — квартирный осветительный щиток; *2* — выключатель однополюсный; *3* — штепсельная розетка; *4* — выключатель двухполюсный; *5* — три провода в линии; *6* — два провода в линии; *Вкл* — выключатель.

ставлена на рисунке 232, *б*. В комнате *II* установлен переключатель, который имеет четыре переключения (рис. 232, *в*).

В положении переключателя, указанном на схеме *в*, обе лампы включены. На первом повороте вправо обе лампы будут выключены. На втором повороте вправо будет включена лампа $Л_1$, а на третьем повороте вправо — лампа $Л_2$. В комнате установлена штепсельная розетка. В комнате *III*, имеющей два входа, установлено четыре лампы, которые зажигаются одновременно (рис. 232, *г*), и два выключателя. Любым из выключателей все лампы могут быть включены или выключены. На рисунке 232, *д* представлена схема освещения, в которой лампы могут быть включены или выключены более чем из двух мест.

§ 8. Рекомендации по монтажу силовых проводок в производственных помещениях

На вводах в производственные помещения устанавливают щитки с предохранителями типа Ц-27 и ПР на асбоцементной плите, в защитном кожухе. Счетчики устанавливают в производственных и животноводческих постройках, стоящих отдельно. Подводку к однофазным счетчикам выполняют двухжильным кабелем АНРГ или АВРГ сечением 2×4 *мм*^{2}, длиной 2 *м* на один счетчик прямого включения. Подводку к трехфазным счетчикам выполняют четырехжильным кабелем АНРГ или АВРГ сечением, соответствующим нагрузке. Групповые щиты можно изготавливать на месте по типовым проектам ВНИПИСельэлектро. Это, например, щиты Ш-СФ6-60, ЩВ-СЗ-20 и др. Широко применяются силовые пункты СП(М) или СП(М)У промышленного исполнения. Можно применять также распределительные шкафы серии ПР 9000 с выключателями А3100, пункты серии ПРБ 59 с блоками «предохранитель-выключатель» (БПВ). В каждом отдельном случае следует руководствоваться соображениями экономической целесообразности, надежности и безопасности в эксплуатации.

§ 9. Элементы монтажа воздушных линий

Порядок монтажа воздушных линий следующий: 1) выбирают направление (трассу линии); 2) устанавливают опоры; 3) натягивают провода.

Направление линии напряжением до 1000 *в* выбирают согласно схеме проекта. Предварительно подготовленные опоры развозят вдоль линии и укладывают у ям, вырытых под опоры. Основные размеры ямы, вырытой вручную для одностоечной опоры, указаны на рисунке 233. В настоящее время широкое применение находят буровые крановые машины, которые бурят яму со скоростью около 1 *м* за 1,5—4 *мин*. Они монтируются на автомобилях (машина БКГМ-АН-63 на автомашине ГАЗ-63 и др.), на тракторах (БИК-9 на тракторе ДТ-54 и др.). Эти же машины устанавливают опоры и могут быть приспособлены для бурения направляющих скважин при погружении свай.

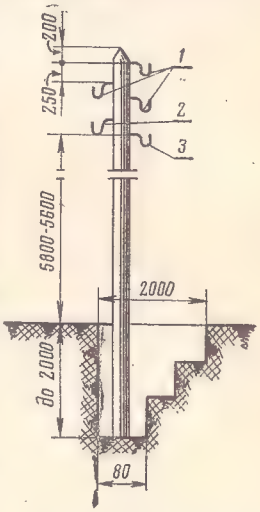


Рис. 233. Основные размеры ямы для опоры в сети 380/220 *в* и самой опоры для пяти проводов:

1 — крюки для изоляторов под фазные провода; *2* — для нулевого провода; *3* — для провода уличного освещения.

Вручную опору поднимают несколько рабочих, пользуясь ухватами. На дне ямы укладывают большой камень. Опору опускают в яму со стороны ступеней. С противоположной стороны подкладывают доску. После установки в яме столб выверяют отвесом и засыпают яму, утрамбовывая землю. Тяжелые и сложные опоры устанавливают при помощи лебедок или трактора. В настоящее время для монтажа проводов широко применяются телескопические вышки.

Крюки и изоляторы закрепляют на опоре до ее установки в яму. Штыревые изоляторы закрепляют на концах штырей и крюков при помощи пакли, пропитанной суриком, смешанным с олифой.

На рисунке 233 представлена одностоечная (свечкообразная) опора низкого напряжения. Изоляторы *1* предназначены для фазных проводов, изолятор *2* — для нулевого провода, а изолятор *3* — для провода наружного освещения при централизованном (из одного центрального места) управлении.

После установки опор вдоль линии раскатывают провод. Соединение проводов на линиях низкого напряже-

ния (скруткой, с последующей пропайкой) можно выполнять непосредственно в пролетах. Провода высокого напряжения также можно соединять в пролетах овальной гильзой с дальнейшей обжимкой ее специальными клещами.

Для защиты от влаги мест соединения проводов их покрывают суриком.

Для соединения стале-алюминиевых, алюминиевых и медных проводов применяют также метод термитной сварки. Технология метода заключается в следующем. Обработанные концы свариваемых проводов закрепляют в кокиле термитного патрона вместе с вкладышем специальными клещами. Под влиянием теплоты, выделяющейся при горении термитной массы, вкладыш расплавляется и сваривает провода. Продолжительность сварки 5—10 *мин*. Сварка должна проводиться в полном соответствии с инструкцией.

Образцы соединений проводов термитной сваркой представлены на рисунке 234.

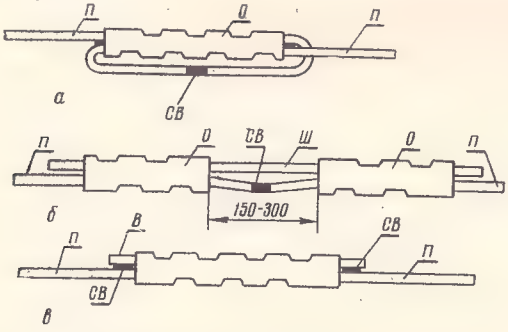


Рис. 234. Термитная сварка с одновременной опрессовкой:

а — соединение в виде петли; *б* — сварка с шунтом; *в* — сварка с вставкой; *П* — свариваемые провода; *СВ* — место сварки; *О* — опрессовка овальной гильзой (для прочности); *Ш* — шунт; *В* — вставка.

Раскатанный провод шестами или веревками поднимают на опоры и укладывают на крюки или специальные монтажные ролики. Затем один конец провода закрепляют на анкерной опоре и натягивают до другой анкерной опоры.

Провода линий напряжения до 1000 *в* натягивают вручную — полиспастом, а линий высокого напряжения с большими пролетами — трактором или лебедкой. На линиях высокого напряжения все три провода натягивают одновременно специальным приспособлением. Стрелу провеса устанавливают в соответствии с монтажной таблицей, в зависимости от температуры воздуха.

Рис. 235. Закрепление провода на штыревых изоляторах.

Высоту провеса визирует монтер, находящийся на опоре, планками, закрепленными на двух смежных опорах. По его команде натяжение проводов прекращают. Затем провода закрепляют сперва на анкерных опорах, а потом на промежуточных. Провода к изоляторам крепят, как показано на рисунке 235, а также специальными зажимами.

§ 10. Соединения кабелей

Кабель прокладывают в траншеях в земле на глубине 800 *мм*, укладывая его на постель в виде слоя песка. Сверху насыпают слой песка и укладывают кирпичи для защиты кабеля от механических повреждений. Кабель укладывают с таким расчетом, чтобы его длина была больше длины траншеи на 1%. Соединения и оконцевания кабеля выполняют в муфтах. Монтаж кабеля при этом должен выполняться тщательно и аккуратно, с точным соблюдением соответствующих инструкций. На рисунке 236 показана разделка кабеля и монтаж его в соединительной чугунной муфте. После тщательной ступенчатой разделки жил кабеля их изгибают и вправляют в фарфоровые распорные пластинки (мостики) *5*. Жилы соединяют гильзами с пропайкой или опрессовкой (гидравлическим прессом). После этого надевают муфту и заливают ее через отверстие битумной кабельной массой.

Кабели напряжением ниже 1000 *в* соединяют в чугунных муфтах. При напряжении выше 1000 *в* применяют свинцовые муфты (для большей герметизации). Свинцовую муфту выполняют в виде отрезка трубы, которую надви-

гают на место соединения жил кабеля. Жилы кабеля в этом случае изолируют кабельной бумагой. Поверх накладывают бандаж из пряжи. Фарфоровые мостики не применяют. Затем свинцовую трубу приваривают к оболочке кабеля с обоих концов, в муфте вырезают два отверстия, через одно из которых муфту заливают масло-канифольной массой. Сверху свинцовых муфт надвигают

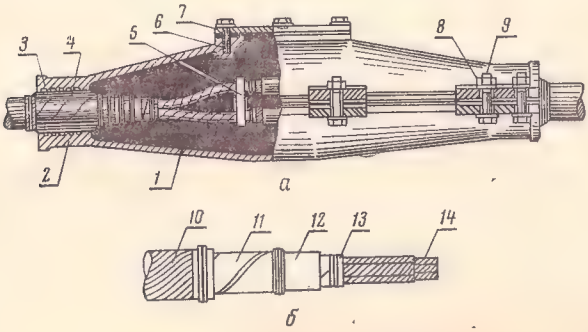


Рис. 236. Монтаж кабеля до 1000 *в* в чугунной соединительной муфте:

а — общий вид смонтированной муфты; *б* — ступенчатая разделка; *1*— кабельная масса; *2*— нижняя полумуфта; *3*— верхняя полумуфта; *4* — уплотнители конца муфты; *5* — фарфоровая распорка; *6*— болт крышки; *7*— крышка; *8*— гайка к стягивающему болту; *9*— стягивающий болт; *10*— джутовый покров; *11*— броня; *12*— свинцовая или алюминиевая оболочка; *13*—поясная бумажная изоляция; *14*— жилы.

стальные или чугунные покрышки для защиты от механических повреждений.

При переходах с воздушной линии на кабельную применяют муфты мачтового типа. Их устанавливают на открытом воздухе. В последнее время применяют также сухую заделку кабеля вместо муфт с заливкой. При сухой заделке разделенные жилы кабеля изолируют хлопчатобумажной лентой или лентой лакоткани. Каждый слой ленты покрывают изоляционным лаком.

На жилы затем надевают свинцовую перчатку, которую плотно соединяют с оболочкой кабеля.

Все разделки и заделки кабеля выполняют в соответствии с инструктивными материалами для данного типа кабеля и вида монтажа.

Глава XXII

Грозозащита в сельских электроустановках

§ 1. Гроза и ее природа

Грозы приносят немалый ущерб сельскому хозяйству: обильные выпадения дождей вызывают наводнения, затопляют поля и огороды, град портит посевы, шквалы и смерчи разрушают постройки, ломают деревья, молнии вызывают пожары, поражают людей и животных.

Облака заряжаются в основном отрицательными зарядами благодаря трению кристаллов льда, водяной пыли и других частиц, из которых состоит облако, о восходящие потоки теплого воздуха.

В происхождении гроз немаловажную роль, вероятно, играет и растительность *, которая выделяет в атмосферу большое количество эфирных масел. Они разлагаются с образованием ионов, которые заряжают облака. Возможно, этим и объясняется то, что грозы бывают лишь в тех местах, где есть растительность, и их почти не бывает в пустынях, над океаном, в полярных областях. В умеренных широтах сезон гроз начинается весной с появлением зелени и кончается осенью с ее увяданием.

Напряженность электрического поля — «конденсатора», одной обкладкой которого является облако, а другой — земля, в среднем составляет около 100 *кв/м*. Там, где плотность зарядов особенно велика, в частности у остроконечных предметов (вершин деревьев, мачт линий электропередач, шпилей на зданиях и т. д.), эта напряженность значительно больше, что является причиной коронного (светящегося) разряда. В том случае, когда напряженность поля достигает критического для воздуха значения 25—30 *кв/см*, происходит разряд конденсатора облако-земля в виде огромной искры — молнии. От обычной искры, например, между двумя проводящими электродами молния несколько отличается. Грозовой разряд начинается с прорастания от облака к земле сна-

* Эта теория возникновения гроз разработана недавно английским ученым Ф. Уэнтом.

чала слабо светящегося канала, движущегося толчкообразно, со скоростью 100—1000 *км/сек*. Средняя длина ступени (толчка) около 50 *м*. Пауза между толчками 30—90 *мксек*. Эта фаза молнии называется ступенчатым лидером. Когда лидер достигает земли, происходит главный разряд, который воспринимается глазом как молния. Это так называемая линейная молния. Общая продолжительность грозового разряда достигает десятых долей секунды, иногда доходя до 1—2 *сек*. Суммарный заряд, переносимый молнией, равен от 1 до 5 *к*. Величина тока молнии обычно достигает нескольких десятков тысяч ампер. Длина молнии может быть от сотен метров до нескольких километров. Температура канала молнии достигает 10 тыс. градусов и более. Благодаря такой высокой температуре воздух в канале молнии быстро, со взрывом, расширяется и ярко светится. Так возникает гром. Гром продолжается и после прекращения разряда, когда после охлаждения канала молнии воздух резко сжимается. Раскаты грома являются следствием многократных, следующих один за другим разрядов молнии, многократного эха — отражения звука от туч и различных предметов на земле, а также длины и пути молнии.

Поскольку звук распространяется в воздухе со скоростью около 0,3 *км/сек*, то гром, возникший у начала молнии длиной, например, 2,5 *км*, будет слышен у конца молнии только через 8 *сек*.

Принимая во внимание указанное выше обстоятельство, можно ориентировочно подсчитать расстояние от наблюдателя до места разряда молнии. Так, например, если время между моментом разряда молнии и началом громовых раскатов 5 *сек*, то примерное расстояние до места разряда $5 \cdot 0{,}3 = 1{,}5$ *км*, где 0,3 *км/сек* — скорость распространения звука в воздухе.

Кроме линейных молний, во время грозы возникают еще так называемые шаровые молнии. Они представляют собой огненные тела в форме арбуза или груши диаметром от 10 до 20 *см*. Длительность существования шаровой молнии — от долей секунды до нескольких десятков секунд. Природа шаровой молнии до конца не выяснена. Предполагают, что это быстро вращающийся сгусток зарядов (плазмы), внутри которого имеется разряжение. Благодаря этому удельный вес

шаровой молнии меньше, чем удельный вес воздуха. Возникает она после удара обычной молнии, в ее электромагнитном поле и до исчезновения получает энергию извне путем поглощения электромагнитной энергии. Когда подвода энергии нет, она исчезает с оглушительным шумом, подобно разбиваемой электрической лампочке. Шаровая молния легко подхватывается и переносится потоками воздуха, может проникать в помещения со сквозняком через открытые окна или двери, через печные трубы и даже небольшие щели. Есть сведения, что шаровая молния проникала в помещение сквозь оконное стекло, в котором она проплавляла небольшое отверстие. Проникнув в помещение, шаровая молния кружит в нем и может выйти обратно тем же путем, каким и вошла. Если в помещении находятся люди, они должны оставаться в этот момент неподвижными. Нельзя обращаться в бегство. В этом случае за человеком устремляется поток воздуха, который увлекает шаровую молнию. Она может смертельно поражать людей, вызывать пожар, разрушать здания.

Надежные способы защиты от шаровой молнии до сих пор не разработаны. Защита в виде молниеотводов не эффективна. Однако в значительной мере уменьшить опасность проникновения шаровой молнии в помещение можно, закрыв двери, окна, вьюшки и т. д. Рекомендуется также над выходными отверстиями дымовых труб, а также в вентиляционных проходах устанавливать заземленные металлические сетки, с площадью отверстий не более 4 *см*^{2} и толщиной проволоки 2—2,5 *мм*. Это мероприятие особенно необходимо для взрывоопасных и пожароопасных помещений.

§ 2. Последствия разрядов линейной молнии и поведение человека во время грозы

Грозовой разряд оказывает электромагнитные, тепловые и механические воздействия на объекты. Во время разряда возникает сильное электромагнитное поле, которое индуктирует напряжение в проводах электрической сети, наружных радиоприемных антеннах, металлических конструкциях, находящихся вблизи от места удара. Перенапряжения в сетях, возникшие от прямого удара в линию или индуктированные при разряде молнии вблизи от

линии, называются атмосферными перенапряжениями; они распространяются на все участки электрической сети. При отсутствии надежной защиты от атмосферных перенапряжений могут быть выведены из строя электрические аппараты на подстанциях или электростанциях, токоприемники у потребителя и т. д.

При прямом ударе молнии в металлические части электроустановок — провода, молниеотводы и т. д.— может произойти выплавление металла на глубину нескольких миллиметров. Раскаленная докрасна проволока (в практике — малого сечения, например плавких предохранителей) распадается на куски. Проплавление стального листа может достигать 3,5 *мм*.

Механическое воздействие молнии проявляется в расщеплении деревьев, деревянных опор линий электропередачи и сетей. Ток молнии, пробегая по волокнам дерева, вызывает мгновенное испарение влаги в древесине. Это взрывообразное испарение влаги расщепляет стволы деревьев или столбы. От воздействия молнии разрушаются кирпичные трубы, каменные и кирпичные постройки. Это действие вызывается электростатическими силами, возникающими между зарядами в диэлектрике.

Попадание молнии в строение, в дерево и в другие объекты может вызвать поражение людей, находящихся внутри этих объектов или около них. Это происходит в результате появления высоких потенциалов между частями объекта, к которым прикасается человек, или между объектом, которого человек касается, и землей, на которой он стоит, и, наконец, между двумя точками на земле, на которых стоят ноги человека.

Рассмотрим случай попадания молнии в дерево и картину потенциалов на земле вокруг него (рис. 237). Во время грозового разряда электрический ток молнии проходит через ствол дерева и растекается во все стороны от дерева в земле, как это показано стрелками. Протекая по дереву и в земле, ток создает падение напряжения на сопротивлении дерева и на сопротивлении земли. Потенциал дерева может достичь сотен тысяч или даже миллионов вольт. Между деревом и точками на земле, находящимися на расстоянии 20—40 *м* от дерева, происходит падение этого потенциала до 0. На диаграмме внизу (рис. 237) по вертикали отложен потенциал, а по

горизонтали — расстояние от дерева в метрах. Характер кривой такой же, как и для случая с заземлителем (рис. 201).

Если человек стоит под деревом и касается его, то он окажется под напряжением, равным примерно 30% от полного потенциала дерева в момент разряда. Оно

Рис. 237. Зона поражения при ударе молнии в дерево.

может достигать десятков и даже сотен тысяч вольт. Рука его лежит на стволе дерева (потенциал $\varphi_{макс}$), ноги стоят на точке земли, имеющей потенциал φ_1. Напряжение прикосновения $U_{пр}=\varphi_{макс}-\varphi_1$. Под действием этого напряжения через тело человека проходит ток. Если человек стоит спиной к дереву, его обе ноги находятся на одинаковом расстоянии от дерева, на линии (окружности) равного потенциала, то есть обе имеют один и тот же потенциал φ_2. Разность потенциалов между ногами составляет около нуля. Во время разряда этому человеку

угрожают падающие сверху сучья и куски дерева. Лошадь стоит дальше от дерева, чем человек. Однако ее положение неблагоприятное, так как ее передние ноги находятся на окружности потенциала φ_3, а задние ноги — на окружности потенциала φ_4. Шаговое напряжение, под которым оказалась лошадь, $U_ш = \varphi_3 - \varphi_4$.

Практически шаговое напряжение человека становится незначительным уже в 10—15 *м* от дерева или от места проникновения молнии в землю.

Точно так же опасно находиться вблизи грозозащитных заземлителей и токоотводов. Для безопасности возле них необходимо делать предупреждающие надписи.

В сельской местности большую опасность во время грозы может представить занос высоких потенциалов в помещение по воздушным проводам. Во время удара молнии в линию заряды ищут выхода в землю. Если отсутствует надлежащая грозозащита в линии, то заряды могут переходить с провода на людей и животных. Зарегистрированы случаи поражения людей, находящихся на расстоянии 1—1,5 *м* от проводки в помещении.

В линии также могут индуктироваться э. д. с. перенапряжения при ударе молнии вблизи от линии. В одном из колхозов Владимирской области только что закончили строительство и монтаж электрических сетей и внутренних проводок. Однако под напряжение их не включили. Линия, которая отключена от трансформаторной подстанции, должна быть заземлена, но это условие не было выполнено. Во время грозы линия оказалась подобной огромной обкладке конденсатора, изолированной от земли. При каждом ударе молнии в проводе индуктировались огромные э. д. с. перенапряжений. Заряды находили выход в землю в местах, наиболее близких к земле или к заземленным объектам. В домах колхозников между проводами внутренней проводки и оштукатуренными стенами при каждом разряде молнии проскакивали искры длиной до 30—40 *см*.

Занос высокого потенциала в помещение может произойти и по антенному вводу, если антенна выполнена не по правилам.

Поэтому при грозе следует избегать прикосновения к элементам электропроводки (выключателям, розеткам, патронам и др.) и к телефонам. При пользовании телефоном в крайнем случае трубку нужно держать на неко-

тором расстоянии от уха, чтобы избежать акустических ударов. Во время грозы опасно находиться на открытом высоком месте, рядом с электрическими и телефонными линиями. Рекомендуется укрываться в небольших углублениях на склонах холмов, вблизи больших камней. При отсутствии подобного места укрытия лучше переждать грозу, присев к земле. Не рекомендуется ехать верхом, бежать или идти по открытому месту, гнать скот по пастбищу, особенно если грозовые разряды совсем рядом, то есть гром следует за молнией с интервалом не более 1—2 *сек*. Пасущийся скот лучше рассредоточить по склонам холмов.

Во время грозы разрешается работать на сельскохозяйственной машине только в том случае, если на ней есть металлическая кабина, соединенная с корпусом машины. В этих условиях человек будет экранирован металлическим кожухом. Во время удара молнии в машину он может быть оглушен звуковым ударом. Однако он не попадает на разность потенциалов: вся машина будет иметь один потенциал. Находиться же рядом с машиной (на земле) опасно из-за угрозы поражения шаговым напряжением или напряжением прикосновения.

§ 3. Грозозащита строений в сельской местности

Число гроз в том или ином районе страны зависит от времени года, от географического положения, от климатических условий, от рельефа местности. Наибольшее число гроз в Советском Союзе приходится на июнь, июль, август. По числу наблюдаемых гроз в году территория Советского Союза разделена на сильногрозовые районы, в которых количество грозовых дней в году достигает 30 и более, на грозовые районы, где наблюдается от 10 до 30 грозовых дней в году, и слабогрозовые районы, в которых количество грозовых дней в году не превышает 10. Слабогрозовые районы — это главным образом северные районы, лежащие за Полярным кругом. Грозозащите подлежат сельские строения в сильногрозовых и грозовых районах. В слабогрозовых районах устройство грозозащиты зданий не обязательно.

Степень вероятности поражения молнией определенного объекта зависит от его высоты, рельефа местности,

свойств грунта, материала здания. В местах, где грунт имеет плохую проводимость, например скалистый или песчаный, молния редко поражает даже высокие места. Поэтому вопрос об устройстве грозозащиты надо решать после выяснения, как часто бывают грозовые разряды на данном участке. Во многих местах Советского Союза из года в год наблюдается повышенная поражаемость отдельных участков населенного пункта, где почва имеет большую проводимость. Наиболее вероятная причина такой избирательности грозовых разрядов — более высокая проводимость грунта в данном месте, обусловленная выходом к поверхности хорошо проводящих глинистых и водоносных слоев.

Конструкция молниеотводов. Для защиты строений от прямых ударов молнии применяют молниеотвод (громоотвод), который состоит из трех основных частей (рис. 238): молниеприемника *1*, воспринимающего удар молнии, токоотвода *2*, соединяющего молниеприемник с заземлителем, и заземлителя *3*, который служит для отвода молнии в землю. Опора молниеотвода выполняется в виде деревянной мачты. В качестве опоры может служить дерево, высокие сооружения в виде башен, вышек и т. д. Мачта может быть выполнена также из стальных труб. Молниеприемники выполняют из стальных стержней, труб, уголковой стали и т. д. с поперечным сечением около 100 *мм*^{2}. При изготовлении молниеприемника из трубы ($\varnothing \geqslant {}^1/_2{}''$) ее верхний конец расплющивают. Молниеприемник устанавливают выше стоек не менее чем на 15 *см* и не более чем на 2 *м*. Токоотводы *2* выполняют из стальной проволоки ($\varnothing \geqslant 6$ *мм*) или ленты сечением 25—30 *мм*^{2}. Молниеприемник лучше присоединять сваркой. Токоотвод прокладывают вплотную к опоре или стене здания. От легковоспламеняющихся крыш (соломенных, тростниковых, щепяных и т. д.) токоотводы прокладывают на расстоянии 10—15 *см* по деревянным держателям. Молниеприемники и токоотводы следует окрашивать устойчивой краской во избежание их ржавления.

Заземление должно иметь сопротивление растеканию 10—20 *ом*. Его выполняют из уголковой стали, труб, круглой или полосовой стали, листов (см. гл. XIX). Заземлители располагают на расстоянии не менее 0,5—0,8 *м* от фундамента защищаемого здания, дальше от входов,

а при защите животноводческих помещений это расстояние должно быть 4—5 *м*. В глинистом, суглинистом и супесчаном грунте двух заземлителей длиной 2,5 *м* из уголковой стали (40×40 или 50×50 *мм*) или труб (диа-

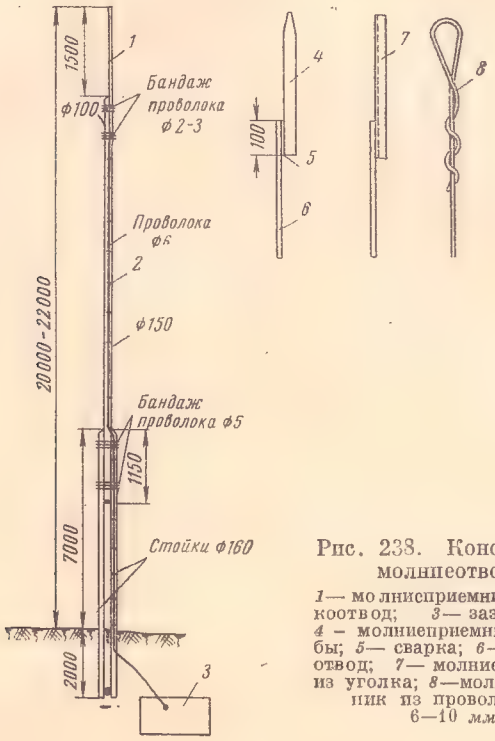


Рис. 238. Конструкция молниеотвода:

1— молниеприемник; *2*— токоотвод; *3*— заземлитель; *4* – молниеприемник из трубы; *5*— сварка; *6*— молниеотвод; *7*— молниеприемник из уголка; *8*—молниеприемник из проволоки Ø 6—10 *мм*

метром 40—60 *мм*) оказывается достаточно, чтобы получить сопротивление растеканию заземления 15—20 *ом*. В песчаном грунте следует взять три заземлителя. Наиболее целесообразное расположение заземлителей на расстоянии не менее 3—6 *м* друг от друга.

В местах с постоянно влажными верхними слоями грунта и там, где трудно забить трубы, выполняют протяженные (горизонтальные) заземлители из полосовой или круглой стали длиной 30—40 *м*. Большая длина заземлителей не увеличивает эффективности заземления.

При выполнении заземления из пластин их следует устанавливать вертикально. Если пластина одна, а размеры ее: a — длина (*м*) и b — ширина (*м*), то должно быть удовлетворено следующее условие: $\sqrt{ab} \geqslant 3$ *м*. Если пластин несколько, их общая площадь должна быть примерно равна площади квадрата со стороной 2,5—3 *м*.

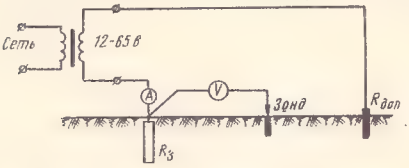


Рис. 239. Метод вольтметра и амперметра при измерении сопротивления растеканию заземлителя.

Для измерения сопротивления растеканию заземлителей используют измерители заземлений типа МС-0,7. Однако для этой цели можно воспользоваться методом вольтметра и амперметра (рис. 239). Для большей безопасности при измерении применяется трансформатор, имеющий вторичное напряжение 12÷36 *в*. Можно использовать сварочный трансформатор с вторичным напряжением 65 *в*. Расстояние между испытуемым заземлением $R_з$ и дополнительным электродом $R_{доп}$ должно быть 40—60 *м*, а между $R_з$ и зондом, к которому подключается вольтметр, не менее 20÷25 *м*. Дополнительный электрод может иметь сопротивление растеканию порядка десятков *ом*. Его назначение — создать цепь для измерительного тока через него и испытуемое заземление. Им может служить одна труба, забитая в землю и увлажненная. З о н д — это стальной стержень с заостренным концом, легко забиваемый в землю. Его назначение — получить в измерительной схеме точки с нулевым потенциалом.

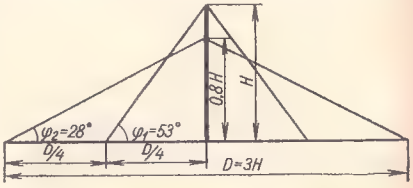


Рис. 240. Защитная зона одиночного молниеотвода.

Защитная зона одиночного стержневого молниеотвода. Вокруг одиночного стержневого молниеотвода образуется зона защиты, имеющая форму двойного конуса (рис. 240). Если высота молниеотвода H, то диаметр нижнего основания зоны защиты $D=3H$. Если объект находится пол-

ностью в зоне защиты молниеотвода, то прямой удар молнии практически не сможет поразить его.

При устройстве молниеотвода для защиты объекта необходимо проверить, будет ли эффективной грозозащита при выбранной высоте молниеотвода. Это выполняется графически (рис. 241). У основания защитной зоны строится контур защищаемого объекта в том же масштабе, что и молниеотвод. Затем проверяют, находятся ли в зоне защиты все детали объекта по высоте. С этой целью строят план объекта и зоны защиты на различных уровнях. На рисунке 241 эти уровни приняты на высоте конька крыши (сечение боковой проекции плоскостью *I*) и на уровне

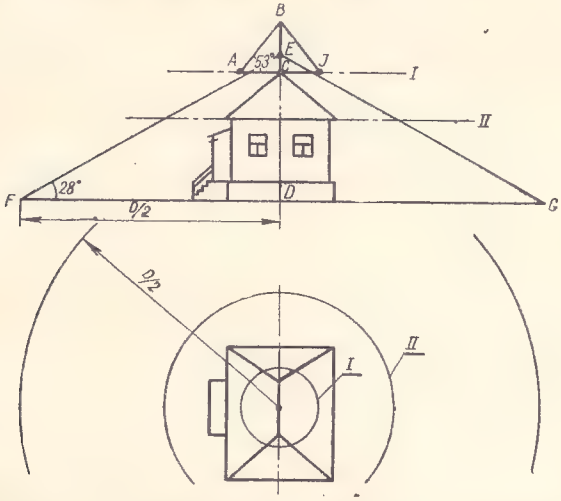


Рис. 241. Проверка эффективности грозозащиты здания.

карниза крыши (сечение боковой проекции плоскостью *II*). На плане видно, что конек крыши вписывается в окружность *I*, полученную в сечении зоны защиты на высоте конька, а карниз вписывается в окружность *II*.

Высоту одиночного стержневого молниеотвода можно определить, исходя из плана и боковой проекции объекта. Для этой цели на плане описывают окружность *I*, внутри которой должны разместиться детали объекта, выступаю-

щие наиболее высоко. Затем след плоскости этой окружности *I* наносят на боковой проекции объекта (отрезок *AJ*). Под углом 53 ° к нему проводят линию *AB* до пересечения с перпендикуляром, восстановленным из центра окружности *I*. Полученный отрезок *BC* в масштабе проекций объекта представляет высоту молниеотвода над коньком здания.

Далее проверяют зону защиты выступающих деталей объекта. Для этой цели на перпендикуляре *BD* находят точку *E* на уровне 0,8 общей высоты *DB*. В эту точку под углом 28° к горизонтали проводят линии *FE* и *GE*, которые при вращении их вокруг оси *BD* образуют зону защиты молниеотвода высотой *DB*.

Защитная зона двойного молниеотвода. Двойные молниеотводы устанавливают на вытянутых объектах, например скотных дворах, мастерских и т. д.

На рисунке 242 показано, как определяют зону защиты двойного молниеотвода. Боковые зоны защиты молниеотводов M_I и M_{II} строят аналогично предыдущему. Затем из точки *A*, лежащей посредине между молниеотводами, восстанавливают перпендикуляр *AB* высотой *4H*, где *H* — высота молниеотвода. Из точки *B* через вершины молниеотводов проводят дугу окружности радиусом *R*. Эта дуга является верхней границей зоны защиты между молниеотводами.

Защитная зона в плане у основания заземлителей представляет собой площадь, перекрываемую окружностями, проведенными из проекций молниеотводов на горизонтальную плоскость с радиусом 1,5 *H*. В средней части зоны откладывают отрезки *AD* и *AE*, равные $1{,}5H_0$, где H_0 — высота условного молниеотвода, восстановленного в точке *A*. Из точек *D* и *E* проводят касательные к окружности *I* и *II*. Зону защиты в сечении плоскости *DAEA'* находят так же, как для одиночного молниеотвода, высотой $H_0 = AA'$. Чтобы выяснить, все ли элементы защищаемого здания входят в зону защиты молниеотводов, необходимо построить очертание защитных зон на различных высотах и контуры здания на тех же высотах, в том же масштабе. Накладывая контуры здания на контуры защитных зон, проверяют способность защитного устройства. На рисунке 242 показано построение защитных зон на различных высотах. При построении этих зон на боковой проекции защитной зоны на принятых заранее

высотах проводят линии *I*, *II* и т. д., представляющие собой следы от горизонтальных плоскостей. Для основания молниеотводов и для принятых сечений строят защитные зоны в горизонтальной проекции так, как это было показано на рисунке 241.

Для некоторых сельскохозяйственных объектов целесообразно выполнять двойной молниеотвод разной высоты,

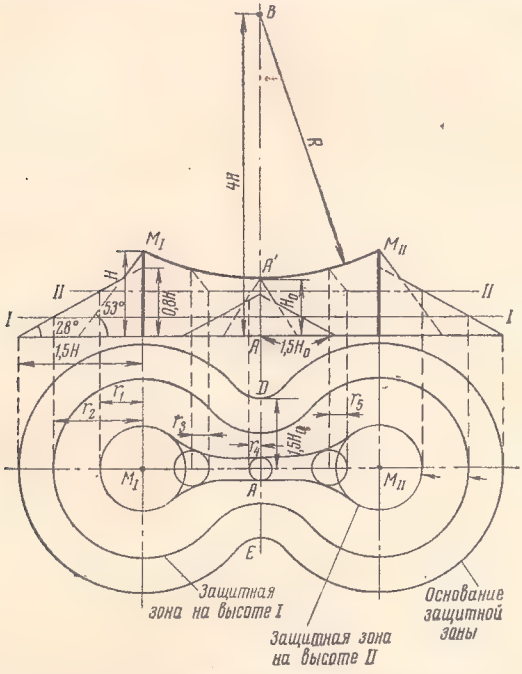


Рис. 242. Зона защиты двойного молниеотвода.

например на силосной башне и на животноводческом помещении. В этом случае построение защитных зон ведется так, как показано на рисунке 243. Для каждого молниеотвода зону защиты строят отдельно. Затем из вершины низшего молниеотвода H_1 проводят горизонтальную линию до получения точки A на защитной зоне молниеотвода H_2. Расстояние от этой точки до земли рассматривается как некоторый фиктивный молниеотвод, взаимодействующий

с молниеотводом H_1. Участок защиты между ними строят, как было показано на рисунке 242.

Зоны защиты многократного стержневого молниеотвода. Многократным стержневым молниеотводом называется группа из трех, четырех и более одиночных стержневых молниеотводов. Они применяются для защиты больших объектов и площадей.

Зоны защиты определяют путем построения зон каждых двух соседних стержневых молниеотводов.

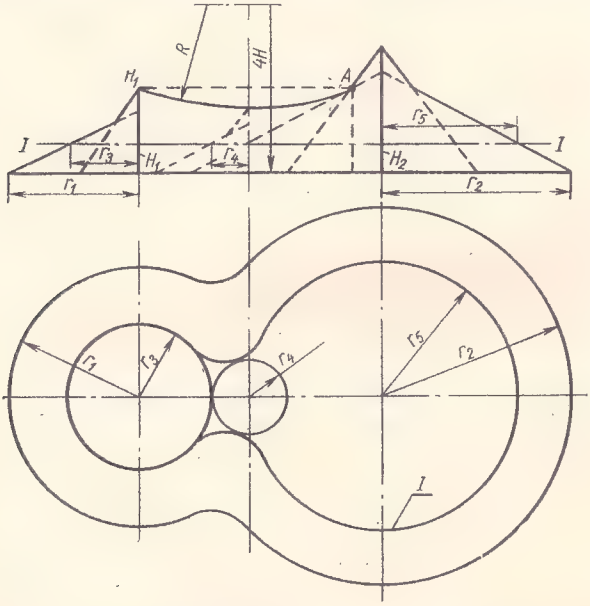


Рис. 243. Зона защиты двух молниеотводов различной высоты.

Другие виды молниеотводов. Кроме стержневых, применяются тросовые молниеотводы, состоящие из одного, двух и более параллельных тросов, горизонтально протянутых над защищаемыми объектами. Тросы соединяют между собой и заземляют. В целом они значительно сложнее стержневых молниеотводов и требуют бóльших затрат материалов.

Если здание покрыто кровельным железом, грозозащиту целесообразно выполнить путем заземления крыши.

§ 4. Примеры грозозащиты сельскохозяйственных объектов

При защите животноводческих построек необходимо учесть то обстоятельство, что животные (особенно лошади) имеют большую чувствительность к шаговым напряжениям. Заземление молниеотводов поэтому следует удалять от строений, чтобы избежать опасных шаговых напряжений на хорошо проводящих полах внутри построек. Если животноводческая постройка значительной длины имеет сгораемую кровлю, грозозащиту целесообразно

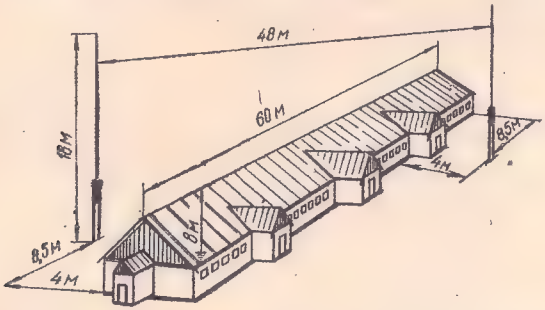


Рис. 244. Грозозащита коровника на 50 голов.

осуществить двумя стоящими отдельно стержневыми молниеотводами, устанавливаемыми, как показано на рисунке 244, вместе с заземлением на расстоянии 4—5 *м* от стен постройки. Если животные могут находиться у места установки заземлителей, их следует огородить на расстоянии 3—4 *м*. На рисунке 244 показан один из наиболее целесообразных вариантов устройства грозозащиты коровника двумя стержневыми молниеотводами. Аналогичное расположение молниеотводов можно принять и при других размерах построек такой конфигурации. В каждом отдельном случае следует проверить защитную зону, как это было показано выше.

Другой метод грозозащиты данной постройки — это установка опор молниеотводов вдоль конька крыши с креплением их к стропилам и ригелям покрытия. В месте прохода через крышу устраивают фартуки из кровельного железа. Места соприкосновения с опорой промазывают битумом. Расстояние между молниеотводами принимается

от 20 до 30 *м* и высота над коньком крыши от 3 до 6 *м*, в зависимости от угла наклона и ширины постройки. Во всех случаях необходимо проверить защитную зону (рис. 245).

Диаметр опоры в верхнем отрубе 10 *см*. Токоотвод из стальной проволоки диаметром 6 *мм*, которая выступает над верхушкой опоры на 30 *см*. На высоте 2 *м* от конька крыши спуск прикрепляют к опоре вязальной проволокой и перебрасывают на столб высотой $H=5$ *м*, устанавливаемый в 10 *м* от здания. По столбу делают спуск к заземлителю. Если на крыше имеются вытяжные вентиляционные трубы, опоры молниеотводов можно крепить к ним.

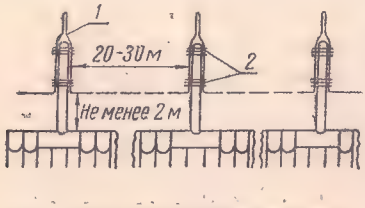


Рис. 245. Многократные молниеотводы вдоль крыши:
1— проволока Ø 6 *мм*; *2*— бандаж проволокой Ø 4—5 *мм*.

Если постройка имеет Т-образную форму или значительно выступающие тамбуры, надежную защиту могут обеспечить три молниеотвода.

Молниеотводы можно устанавливать на силосных башнях (из уголковой стали 50×50×5 *мм*, длиной 5 *м*). Над крышей башни молниеотводы возвышаются на 2,65 *м*. При защите водонапорной башни молниеотвод должен возвышаться на 2,5 *м* над крышей.

Для грозозащиты производственной мастерской могут быть использованы четыре молниеотвода (по углам). Грозозащита может быть также осуществлена установкой многократных молниеотводов по краю верхней части крыши, возвышающихся на 3—5 *м*. На трубах, которые не попадают в зону защиты этих молниеотводов, устанавливают дополнительные молниеприемники, выступающие на 15—20 *см* над трубой.

Если грозовые разряды приносят ущерб в различных частях населенного пункта, можно поставить грозозащиту для всего населенного пункта. Для этой цели необходимо установить молниеотводы высотой 22 *м* на расстоянии 100 *м* друг от друга вдоль линий домов.

Во всех случаях при устройстве грозозащиты в первую очередь нужно уложить заземлители. Молниеотводы и токоотводы после их установки следует немедленно подключать к заземлителям.

§ 5. Меры по грозозащите при устройстве наружных антенн приемников и телевизоров в сельской местности

Случаи попадания молнии в антенну чрезвычайно редки. В антеннах для радиоприемников, имеющих значительную горизонтальную длину и высоту, во время грозовых разрядов в непосредственной близости от них индуктируются статические заряды, которые могут повредить приемник. Статические заряды в антенне могут скопиться и при отсутствии грозы, но при сильном сухом и пыльном ветре. Для предохранения установки от повреждения следует устанавливать грозовые переключатели и грозоразрядники (искроразрядники). В летнее время, когда прием не производится, антенну следует держать заземленной. При приближении грозы следует прекращать прием и заземлять антенну.

На рисунке 246 показано, как должна быть выполнена антенна. Изображено два возможных варианта грозозащиты. Первый (рис. 246, *а*) — с грозоразрядником и грозовым переключателем антенны на прием и заземление. При отсутствии переключателя можно использовать вариант с грозоразрядником (рис. 246, *б*). На рисунке 246, *в* показано три варианта устройства заземления для радиоприемной антенны. Для этой цели могут быть использованы труба *1*, старое ведро *2*, к которому надежно припаивается провод заземления. Можно также использовать моток провода *3* в качестве заземлителя. Глубина заложения заземлителя 1—1,5 *м*. Если почва песчаная, заземлитель целесообразно засыпать слоем 10—15 *см* мелкотолченого древесного угля и плотно утрамбовать его. Целесообразно также увлажнить место заложения заземлителя.

При устройстве антенны необходимо соблюдать следующее правило безопасности: в первую очередь выполнить заземление, ввести в помещение ввод антенны, а затем поднять антенные мачты. Очень опасно, стоя на земле, держать ввод поднятой антенны в руках; даже в сухую ветреную погоду в антенне могут появиться статические заряды. Сетевые приемники в большинстве случаев не нуждаются в подсоединении корпуса к заземлению, так как роль заземления частично выполняет сеть. Но в некоторых случаях заземление способствует уменьшению фона

переменного тока. Батарейные приемники при наличии заземления всегда работают лучше, чем без него. Однако всегда необходимо иметь заземление для антенны на случай грозы.

При устройстве заземления телевизионной антенны (рис. 247) к антенному фидеру у приемника подключают двойной провод длиной около 1500 *мм* (для Московского телецентра). При разомкнутых противоположных концах эти два провода замыкают в различных точках, начиная от концов (изоляцию прорезают и замыкают ножом, рис. 247, *а*). По наибольшей контрастности изображения определяют точку замыкания, в которой провода соединяют и заземляют. К этой точке можно также подключать радиоприемник. Тогда место спая переключают на заземление во время грозы. Заземляющий проводник можно отвести от антенны, как показано на рисунке 247, *б*.

§ 6. Грозозащита сельских линий передач и сетей

Как отмечалось, во время грозы в проводах низковольтных сетей возникают атмосферные перенапряжения в результате прямого удара молнии в провода воздушных линий или из-за индукции под действием грозовых разрядов в стороне от линии. Эти потенциалы при отсутствии грозозащиты заносятся в здания и могут быть причиной пожара или поражения человека.

Для уменьшения опасности заносов высоких потенциалов необходимо заземлять штыри или крюки линейных изоляторов и нулевой провод на вводах линий в здания, а также заземлять крюки и нулевой провод на первой опоре от ввода и через каждые 5—6 пролетов линии и на ее ответвлениях. Грозозащитные заземления совмещают с защитным повторным заземлением нулевого провода.

Атмосферные перенапряжения снижаются благодаря наличию емкостной связи крюк — провод через изолятор. Сопротивление растеканию грозозащитного заземлителя должно быть не более 50 *ом*. Он может быть выполнен протяженным (продолжение спуска молниеотвода стальным проводом ϕ 6 *мм*) или в виде спирали, наложенной продолжением молниеотвода на комель приставки, вкапываемой в землю, на длине 1 *м*.

Наиболее простая и надежная защита внутренней проводки домов, а значит, и людей от опасности поражения

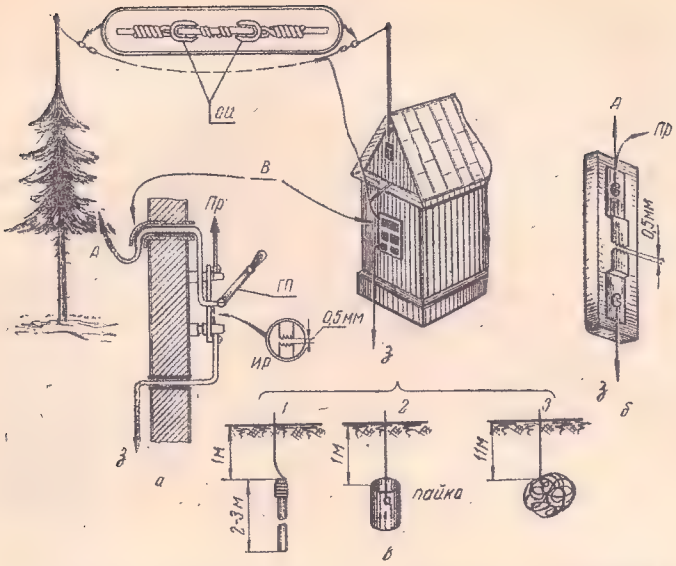


Рис. 246. Устройство наружной антенны с грозозащитой:

а — с грозовым переключателем *(ГП)* и искроразрядником *(ИР)*; *б* — только с искроразрядником; *в* — устройство заземления; *1* — труба; *2* — ведро; *3* — моток провода; *ОИ* — орешковые изоляторы; *з* — к заземлению; *А* — к антенне; *Пр* — к приемнику; *В* — ввод.

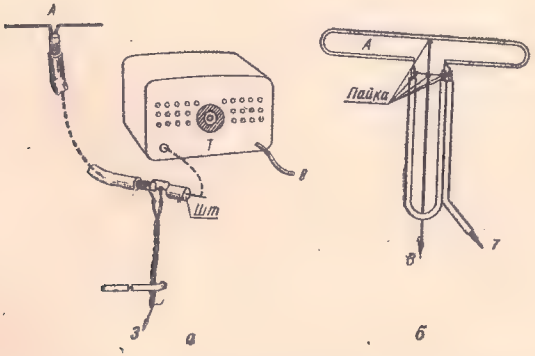


Рис. 247. Устройство заземления для телевизионной антенны:

Т — телевизор; *А* — антенна; *Шт* — штеккер; *С* — сеть.

грозовыми разрядами — это приближение очагов заземления к домам. Надо заземлять крюки изоляторов на вводе и на линиях через искровые промежутки 5—8 *мм*.

Расстояние между отдельными заземленными точками на линии должно быть не более 100—200 *м*. При расстоянии более 200 *м* защитный эффект заземления сильно снижается. Лучше, если каждый ввод в дом находится между

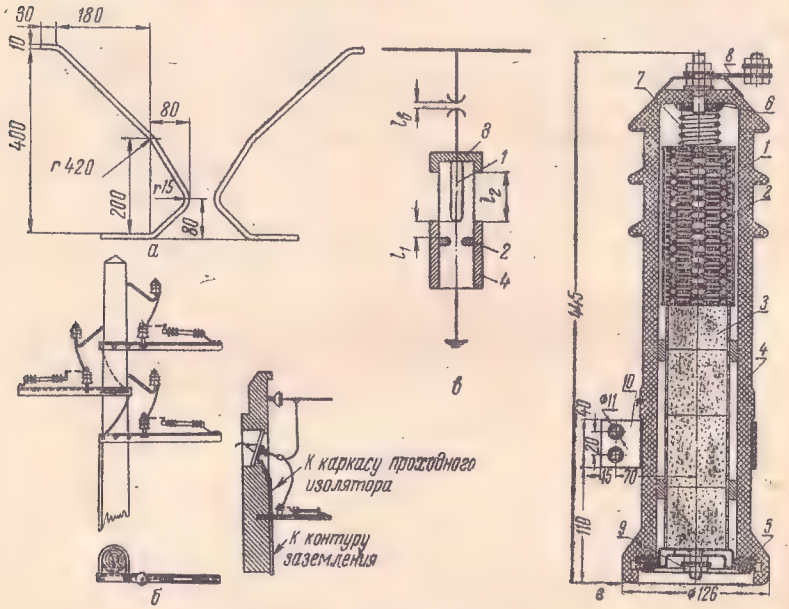


Рис. 248. Грозоразрядники:

а — защитный промежуток; *б* — установка трубчатых разрядников на опоре и на вводе в закрытую подстанцию; *в* — схема включения разрядника: l_1 — внутренний искровой промежуток; l_2 — промежуток на внешней поверхности винипластовой трубки; $l_в$ — внешний искровой промежуток; *1* — стержневой электрод; *2* — кольцевой электрод; *3* — закрытый наконечник; *4* — открытый наконечник; *г* — разрез разрядника РС-10: *1* — многократный искровой промежуток; *2* — бумажно-бакелитовый цилиндр; *3* — рабочее сопротивление; *4* — герметичный фарфоровый кожух; *5* и *6* — герметизирующее уплотнение из озоностойкой резины; *7* — спиральная пружина; *8* — контакт для подключения фазы сети; *9* — шпилька для подключения заземления; *10* — хомут для крепления.

двумя заземленными точками, расположенными на расстоянии не более 100—200 *м*. Если заземление только с одной стороны от ввода, то расстояние до него не должно быть более 50—80 *м*.

Со стороны высокого напряжения 6—10 *кв* на подстанциях устанавливают простые искровые промежутки и разрядники.

Защитный (искровой) промежуток. Защитный промежуток — простейшее устройство для защиты высоковольтных электроустановок от атмосферных перенапряжений. В настоящее время защитные промежутки вытесняются разрядниками. Защитный промежуток (рис. 248, *а*) изготавливают в виде усов из круглой стали диаметром не менее 10 *мм*. Длину искрового промежутка выбирают в зависимости от напряжения и наличия других защитных средств (табл. 41). Усы, которыми снабжен искровой промежуток, способствуют гашению дуги во время пробоя промежутка. Дуга вытесняется кверху, растягивается и гаснет.

Таблица 41

Размеры защитных и дополнительных промежутков в зависимости от напряжения в сети

Номинальное напряжение установки (*кв*)	Величина защитных промежутков (*мм*)		Дополнительный промежуток в заземляющем спуске (*мм*)
	на подстанциях, где применены и другие грозозащитные аппараты	на подстанциях, где отсутствуют другие грозозащитные аппараты	
3	20	10	5
6	40	20	10
10	50	30	15
20	180	120	20

В заземляющем спуске необходим дополнительный промежуток для того, чтобы предотвратить отключение установки при случайных перекрытиях защитного промежутка (птицами, при засорении). Основные недостатки защитных промежутков следующие: 1) отсутствуют дугогасительные устройства, что приводит к отключению установки (трансформаторной подстанции) при пробое, поэтому необходимо устраивать автоматическое повторное включение АПВ; 2) не всегда надежна грозозащита трансформаторов на подстанции.

Вентильные и трубчатые разрядники. Вентильный разрядник представляет собой последовательное соединение искровых промежутков с сопротивле-

нием, величина которого меняется в зависимости от приложенного напряжения. Чем больше приложенное напряжение (при перенапряжениях), тем меньше величина сопротивления. В качестве сопротивления используется вилит — специально разработанный для этой цели материал.

Вилитовый разрядник на 6 *кв* состоит из семи последовательно соединенных искровых промежутков и шести вилитовых дисков. Промежутки и диски заключены в герметический фарфоровый кожух. Верхний контакт присоединяется к проводу сети, нижний — к заземлителю. Вилитовые разрядники изготавливают и для низковольтных сетей — до 500 *в* и для высоковольтных сетей — до 220 *кв*. По назначению они делятся на три типа: станционные разрядники (РВС), разрядники для защиты вращающихся машин (РВВМ) и подстанционные разрядники (РВП), отличающиеся конструкцией искровых промежутков и величиной напряжения срабатывания. Вентильные разрядники — лучший вид разрядников, они широко применяются в электрических установках всех типов. При обозначении вентильных разрядников за буквенным обозначением указывается рабочее напряжение: например, РВС-6, РВВМ-3, РВП-10, соответственно на 6; 3 и 10 *кв*.

Трубчатый разрядник состоит из внешнего и внутреннего искровых промежутков, соединенных последовательно (рис. 248, *б* и *в*). Внутренний промежуток расположен в трубке из материала, который выделяет газы под воздействием дуги (фибра, органическое стекло или винипласт). При грозовом разряде искровые промежутки пробиваются и ток разряда уходит в землю, благодаря чему величина перенапряжения уменьшается. Одновременно через разрядник идет ток короткого замыкания рабочей частоты. Это приводит к образованию в трубке электрической дуги. Под действием высокой температуры дуги стенки трубки бурно выделяют большое количество газов, которые вырываются из трубки под большим давлением (100—500 *ат*) и выдувают дугу. Дуга гасится в течение 1—2 периодов тока. Внешний искровой промежуток служит для того, чтобы трубка разрядника не находилась под напряжением.

Трубчатые разрядники изготавливают на напряжение до 110 *кв*. Для определения срабатывания разрядника имеется указатель действия в виде бронзовой полоски,

которая выдувается газами при срабатывании разрядника. Трубчатые разрядники выходят из строя обычно после 6—7 коротких замыканий при максимальном токе к. з. Внутренний диаметр при этом увеличивается, уменьшается давление, деионизация идет медленнее и разрядник не в состоянии прерывать сопровождающий ток. Разрядники РВП (вентильные подстанционные) предназначены для защиты изоляции электрооборудования от атмосферных перенапряжений и применяются в открытых и закрытых электроустановках с напряжением 3, 6 и 10 *кв* (соответственно РВП-3; РВП-6; РВП-10). В зависимости от напряжения разрядники имеют то или иное число вилитовых дисков. И пробивное напряжение для указанных разрядников соответственно равно 9—11; 16—19; 26—30 *кв*.

Разрядник РС-10 предназначен для защиты от атмосферных перенапряжений изоляции электрооборудования сельских электрических установок с напряжением 10 *кв* и током короткого замыкания от 30 *а* и выше. Импульсное пробивное напряжение — 26—30,5 *кв*. Разрядник РС-10 является модификацией разрядника РВП-10 и отличается от последнего высотой столба рабочих сопротивлений и количеством единичных искровых промежутков. Разрез разрядника РС-10 представлен на рисунке 248, *г*.

§ 7. Эксплуатация грозозащитных устройств

Над вентильными и трубчатыми разрядниками необходимо установить тщательный надзор и контроль. Ежегодно следует проводить их ревизию. Вентильные разрядники рекомендуется ежемесячно осматривать, обращая внимание в первую очередь на целость фарфоровых чехлов. Металлические части должны быть защищены от коррозии. Фарфор нужно систематически очищать от загрязнения. Основной контроль за состоянием разрядника заключается в ежегодном измерении токов проводимости при постоянном напряжении на специально оборудованном стенде. Все мероприятия по эксплуатации вентильных разрядников проводят согласно «Инструкции по монтажу, профилактике и ревизии вентильных разрядников».

Трубчатые разрядники осматривают при каждом обходе линии. При осмотре устанавливают положение инди-

катора срабатывания. Если он сработал, то тщательно осматривают в бинокль, нет ли следов повреждения на трубке, арматуре, изоляторах, траверсе опоры, не разрегулировался ли искровой промежуток. Случаи срабатывания разрядников регистрируют в специальном журнале. При обнаружении повреждений на разряднике его заменяют новым.

В конце грозового сезона проводят верховую ревизию разрядников РТ и РТВ, покрытых атмосферостойким лаком. Разрядники, имеющие видимые повреждения, отправляют в ремонт. Достаточным признаком для отбраковки является наличие даже мельчайших трещин, потемнения или сморщивания лаковой пленки. Разрядники, прошедшие ревизию, оставляют на опорах. Для предотвращения возможного повреждения при снегопадах разрядник поворачивают так, чтобы расстояние от проводов до электрода разрядника было не меньше 0,3 *м* при напряжении сети 3—10 *кв*.

Перед началом грозового сезона проводят основную ревизию разрядников. Их снимают и осматривают на земле, проверяют дугогасящий канал и внутренний искровой промежуток (с помощью специального щупа). Вывинчивают и осматривают стержневой электрод. Периодическим осмотрам должны подвергаться и молниеотводы, защищающие постройки и здания. Перед началом грозового сезона проводят ревизию, в которую входит проверка целости всех токоотводов (внешний осмотр). Проверяют надежность соединений токоотводов и их крепление. Если верхняя часть молниеприемника выгорела (от разрядов) и укоротилась, его следует восстановить до начальных размеров, подсоединив новый кусок стержня трубы или катанки.

Необходимо проверить также состояние частей деревянных опор, которые подвержены гниению. При загнивании опоры на 30—40% по площади сечения ее нужно заменить новой или укрепить приставками.

Состояние заземлителей проверяют не реже одного раза в 2 года путем измерения сопротивления растеканию способами, указанными выше. Если сопротивление растеканию увеличилось на 20% выше допустимого, нужно уложить новые заземлители. Если грозозащита общественных зданий и сооружений выполнена вновь, то необходимо провести прием ее в эксплуатацию с оформлением соответствующей документации.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ДЛЯ ПРИВОДА МАШИН, ОСВЕЩЕНИЯ, ОБЛУЧЕНИЯ И ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛА

Глава XXIII

Электропривод в сельском хозяйстве

§ 1. Общие сведения об электроприводе. Механические характеристики приводов

Совокупность двигателя, передаточного механизма и рабочей машины называют производственным агрегатом или машинным устройством.

Часть производственного агрегата, состоящая из двигателя и передаточного механизма к рабочей машине, называется приводом. Привод, в котором в качестве двигателя используется электродвигатель, называется электроприводом. Понятие «электропривод», таким образом, объединяет электродвигатель, аппаратуру управления двигателем и передаточный механизм к рабочей машине.

Кроме электропривода, в сельском хозяйстве используется ручной привод, конный, механический (ветроколесо, водяное колесо, тепловой двигатель и т. д.).

Электропривод по числу машин, приходящихся на электродвигатель, подразделяется на групповой, одиночный и многодвигательный.

Групповым электроприводом называется такой привод, при котором от одного электродвигателя приводится в действие несколько машин при помощи одной или нескольких трансмиссий. Движение от двигателя к рабочим машинам передается по трансмиссионным валам. Такой привод в настоящее время не выполняют, так как в трансмиссионных валах большое количе-

ство энергии тратится на преодоление потерь на трение. Но такие приводы кое-где сохранились на старых предприятиях, где тепловая машина или водяное колесо были заменены электродвигателем. Тепловая или водяная машина имели большую мощность в одной единице, а дробить эту мощность не представлялось возможным.

Групповой привод в настоящее время встречается также там, где электрифицируется старое предприятие или машины используются редко, а потому применять двигатели на каждой из машин нерентабельно.

Одиночный привод может быть простым одиночным электроприводом или индивидуальным. В простом одиночном электроприводе двигатель связан с машиной через какую-либо передачу. Примером такого привода может служить электропривод вакуум-насоса доильного агрегата.

В индивидуальном электроприводе электродвигатель конструктивно приспосабливают к рабочей машине таким образом, что отдельные части электродвигателя одновременно являются частями рабочей машины. Примером этому может служить электросверло, электровентилятор и др.

Многодвигательный электропривод встречается на сложных машинах, в которых отдельные рабочие органы приводятся отдельными двигателями. Широко распространен многодвигательный привод в сложных металлообрабатывающих станках, прокатных станах в металлургической промышленности, в машинах для приготовления комбикормов, инкубаторах и т. д. По способу управления электроприводы могут быть разделены на следующие группы:

1) неавтоматизированный привод, то есть управляют агрегатом вручную;

2) автоматизированный электропривод, когда управление (включение и выключение) осуществляется автоматически от воздействия внешнего фактора (например, температуры в инкубаторах и хранилищах, уровня воды в водонапорных башнях и т. п.);

3) полуавтоматический электропривод, когда, например, включают двигатель вручную, а выключается он автоматически.

При выборе электродвигателя для привода машин необходимо знать механические характеристики произ-

водственных механизмов или рабочих машин и механические характеристики электродвигателей (рис. 249).

Механической характеристикой производственного механизма называют зависимость между скоростью и моментом сопротивления на его валу:

$$n = f(M_c). \qquad (219)$$

Механической характеристикой электрического двигателя называется зависимость его скорости от момента вращения:

$$n = f(M_{дв}). \qquad (220)$$

При выборе двигателя для привода машины стремятся к тому, чтобы механические характеристики электродви-

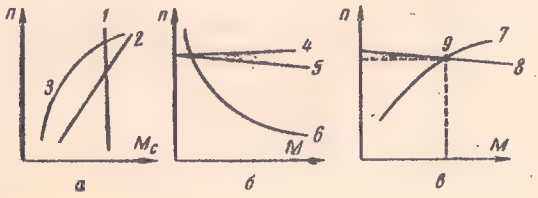


Рис. 249. Основные механические характеристики:

а — производственных механизмов; *б* — электрических двигателей; *в* — определение рабочей точки системы двигатель —механизм; *1*— не зависящая от скорости вращения; *2* — прямолинейно-возрастающая; *3* — параболлическая; *4* — абсолютно жесткая; *5*— жесткая; *6*— мягкая; *7*— машины; *8*— двигателя; *9* — рабочая точка.

гателя соответствовали механическим характеристикам машины. Кроме того, двигатель должен удовлетворять ряду других требований производственного механизма: иметь достаточные пусковые и перегрузочные усилия и т. д.

У производственных механизмов механические характеристики разделяются на следующие категории.

1. Не зависящая от скорости механическая характеристика (прямая *1* на рис. 249, *а*). Момент сопротивления M_c не меняется при изменении скорости. Такие характеристики имеют подъемные краны, лебедки, транспортеры с постоянной массой передвигаемого материала и т. д.

2. Прямолинейно возрастающая механическая характеристика (прямая *2*). Такую характеристику имеет, например, генератор с независимым возбуждением, который работает на постоянное сопротивление во внешней цепи.

3. Параболическая механическая характеристика (кривая *3*). Такую характеристику имеют центробежные насосы, вентиляторы и др. Здесь момент сопротивления машины зависит от квадрата скорости.

У двигателей механические характеристики разделяются на следующие категории.

1. Абсолютно жесткая механическая характеристика, когда скорость вращения электродвигателя не изменяется при изменении момента на его валу (прямая *4*). Такую характеристику имеют синхронные электродвигатели.

2. Жесткая механическая характеристика, при которой скорость вращения электродвигателя изменяется незначительно в зависимости от изменения момента на его валу (прямая *5*). Такую характеристику имеют электродвигатели постоянного тока с параллельным возбуждением и асинхронные электродвигатели в пределах рабочей части механической характеристики.

3. Мягкая механическая характеристика, при которой скорость вращения электродвигателя с увеличением момента на его валу значительно уменьшается (кривая *6*). Такую характеристику имеют электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением.

В установившемся режиме работы агрегата двигатель — рабочая машина момент сопротивления машины равен вращающему моменту электродвигателя при вполне определенной скорости вращения (рис. 249, *в*). Если момент сопротивления на валу рабочей машины изменится, то автоматически изменятся вращающий момент и скорость вращения электродвигателя, агрегат будет продолжать работать при новой скорости вращения, с новым значением момента.

При проектировании электропривода механическая характеристика производственного механизма обычно известна. А для получения устойчивой работы агрегата

в установившемся режиме при определенных скоростях и моментах сопротивления производственного механизма необходимо подобрать двигатель с соответствующей механической характеристикой.

Механические характеристики электродвигателей разделяются на естественные и искусственные.

Естественная механическая характеристика представляет собой зависимость оборотов от момента в нормальных условиях работы электродвигателя при номинальном напряжении, приложенном к его обмоткам, и при отсутствии дополнительных сопротивлений в цепях его обмоток (другие величины тоже номинальные).

Так, например, естественная характеристика электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением строится при нормальном значении напряжения, магнитного потока и при внешнем сопротивлении в цепи якоря, равном нулю.

Искусственная механическая характеристика представляет собой зависимость скорости вращения от момента при наличии дополнительного сопротивления в цепи якоря или ротора. Большинству сельскохозяйственных производственных машин удовлетворяют характеристики асинхронных короткозамкнутых двигателей.

§ 2. Тепловой режим электродвигателя и выбор его мощности

Нагрев электродвигателей и их тепловой режим — важнейшие факторы, определяющие предельную нагрузку на электродвигатель. Нагрев двигателя обусловливается потерями в обмотках и потерями на вихревые токи в железе статора и ротора.

При включении двигателя в работу его температура повышается до тех пор, пока не установится тепловое равновесие, при котором все выделяющееся в двигателе тепло будет передаваться окружающей среде, и дальнейший рост температуры прекратится.

На рисунке 250 характер нагрева двигателя (зависимость температуры двигателя от продолжительности работы) представлен графически. Допустимый нагрев до $v_{уст}$ определяется в основном теплостойкостью изоляции двигателя. Изоляция по своей теплостойкости делится на ряд

классов. К классу А относятся пропитанные или погруженные в масло волокнистые материалы, а также эмаль. Наибольшая допустимая температура для этого класса изоляции 105°. К классу В относятся изделия из слюды и асбеста, содержащие вяжущие вещества. Наибольшая температура нагрева 120°. К классу ВС относятся изделия из слюды, стеклянной пряжи и асбеста на теплостойких лаках. Наибольшая температура нагрева 135° и т. д. Температуру окружающей среды при анализе тепловых режимов принято считать +35°.

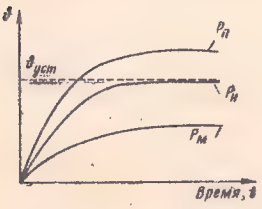


Рис. 250. Характер нагрева электродвигателя в зависимости от нагрузки:

$P_м$ — двигатель недогружен; $P_н$ — номинальная нагрузка; $P_п$ — двигатель перегружен.

В зависимости от нагрузки электродвигателя его установившаяся температура может меняться в широких пределах. При номинальной нагрузке температура обмоток двигателя будет достигать максимально допустимого значения, установленного для данного класса изоляции (кривая $P_н$). При перегрузке двигателя его температура значительно превзойдет допустимую (кривая $P_п$). При недогрузках двигателя температура его будет меньше допустимой (кривая $P_м$). Длительная перегрузка недопустима по той причине, что изоляция может обуглиться, и двигатель выйдет из строя.

Практически не представляется возможным замерить действительную температуру нагрева, поэтому введено понятие наибольшей наблюдаемой температуры, которая принимается на 10° меньше соответствующих максимально допускаемых температур для классов изоляции.

На практике двигатель для рабочей машины можно подбирать по справочным данным или по рекомендациям завода — изготовителя машины, которые указываются в технической документации к машине. В свою очередь, эти рекомендации даются на основании проведенных технических расчетов и опытов.

При выборе мощности электродвигателя для машины в первую очередь учитывают характер нагрузки, которую будет выполнять электродвигатель. В зависимости от продолжительности и характера нагрузки принята следую-

щая классификация режимов работы электродвигателя: длительный, повторно-кратковременный и кратковременный.

В длительном режиме с постоянной нагрузкой работают насосы, вентиляторы, транспортеры и др. Некоторые машины работают в длительном режиме с переменной нагрузкой, в частности молотилки, молотковые мельницы, соломосилосорезки, металлорежущие станки и др. Во всех этих случаях рабочий период настолько велик, что температура обмоток достигает установившегося значения (рис. 251, *а* и *б*).

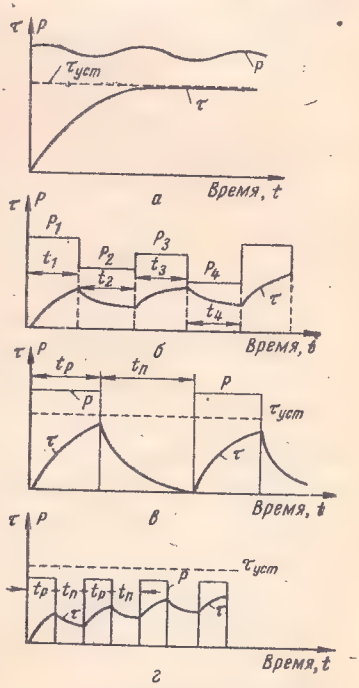


Рис. 251. Характеры нагрузки и нагрева двигателя при длительном режиме работы (*а*) и (*б*), кратковременном (*в*) и повторно-кратковременном (*г*).

Кратковременным режимом работы называется такой режим, при котором температура двигателя за рабочий цикл не успевает возрасти до установившейся, а за паузу между рабочими циклами температура двигателя успевает снизиться до первоначальной. Такой характер работы с длительными перерывами (рис. 251, *в*) имеют, например, двигатели, установленные для привода задвижек или щитов на оросительных трубах или каналах, на электростанциях и т. д.

Повторно-кратковременный режим работы — это такой режим, при котором за любой рабочий цикл температура не достигает установившейся величины, а за паузу двигатель не достигает полного охлаждения (рис. 251, *г*). Такой режим работы имеют некоторые станки (прессы, молоты и др.).

Для режима кратковременной нагрузки выпускаются специальные электродвигатели, в паспорте

которых указаны кратковременная мощность и время, в течение которого двигатель может работать при данной мощности (6, 10, 15, 30, 60, 90, 120 *мин*). Если двигатель будет работать более продолжительное время, чем указано в паспорте, но при той же мощности, то температура обмоток превысит максимально допустимую для данного двигателя.

Для повторно-кратковременного режима также выпускаются специальные двигатели. В их паспорте указывается коэффициент ПВ в процентах. Этот коэффициент называется относительной продолжительностью включения и определяется так (рис. 251, *г*):

$$\text{ПВ} = \frac{t_р}{t_р + t_п} 100\%, \qquad (221)$$

где $t_р$ — продолжительность работы;

$t_п$ — продолжительность паузы.

Двигатели изготавливаются для ПВ, равных 15, 26, 40, 60%, и рассчитаны на циклы $t_ц = t_р + t_п$ не более 10 *мин*. Например, на кранах используются электродвигатели с ПВ=25%. Их нельзя включать на длительное время при той мощности, которая указана в паспорте.

Двигатели АОС2 рассчитываются на ПВ=25%, но могут работать и с ПВ=15%, 40%, 60%, 100%. Соответственно их мощности, определяемые тепловым режимом, изменяются. Так, двигатель АОС2-52-2 для ПВ=25% имеет номинальную мощность 13 *квт*. При работе с ПВ=15% он может быть загружен до 15 *квт*; при ПВ=40% нагрузка не должна превышать 11,1 *квт*, а при ПВ=60% — 10,1 *квт*. При ПВ=100% загрузка должна составлять 9,1 *квт*.

Для машин, которые необходимо перевести на электропривод, двигатель можно подобрать по нагрузочным диаграммам. Нагрузочные диаграммы можно снимать каким-либо регистрирующим прибором (ваттметром, амперметром). Чтобы получить диаграмму для машины, вначале можно взять электродвигатель заведомо большей мощности и записать мощности при холостом ходе двигателя и при нагрузке машины. Разница между мощностями при полной нагрузке и холостом ходе двигателя дает приближенное значение мощности, потребляемой машиной. Целесообразная мощность двигателя для дан-

ной машины будет 1,1—1,25 от полученной в опыте величины мощности машины.

Если характер нагрузки такой, как показано на рисунке 251, *б*, то потребную мощность двигателя можно подсчитать по формуле

$$P_{дв} = (1{,}1 \div 1{,}25)\, P_{экв} = $$

$$= (1{,}1 \div 1{,}25) \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}. \qquad (222)$$

Для насосов мощность двигателя подсчитывают по формуле

$$P_{дв} = \frac{QH\gamma}{102\eta_{нас}\eta_{пер}} \; квт, \qquad (223)$$

где Q — производительность насоса ($м^3/сек$);

H — общая расчетная высота подачи насоса ($м$), в которую входят высоты всасывания, нагнетания и потерь в трубах;

γ — удельный вес жидкости ($кг/м^3$); для воды $\gamma = 1000$ $кг/м^3$;

$\eta_{нас}, \eta_{пер}$ — соответственно к. п. д. насоса и к. п. д. передачи.

§ 3. Механическая передача от двигателя к рабочей машине

Для снижения оборотов применяются разные передаточные механизмы. В сельскохозяйственных установках используются следующие виды передач: ременная, зубчатая, фрикционная, червячная, цепная, гибкий вал, жесткая муфта и т. д. Все передачи характеризуются передаточным числом i, показывающим, во сколько раз изменяется число оборотов.

Ременная передача передает вращение при помощи бесконечного ремня (плоского, клинового или текстропного, круглого). Ее преимущества — простота, возможность перекрывать значительные расстояния, бесшумность в работе и способность воспринимать колебания нагрузки. Недостатки — низкий к. п. д., меньшая долговечность, электризация ремня. При ременной передаче

$$\frac{D_{дв}}{D_м} = \frac{n_м}{n_{дв} k}, \qquad (224)$$

где $D_{дв}$ — диаметр шкива двигателя;
$D_м$ — диаметр шкива машины;
$n_м$ — число оборотов шкива машины;
$n_{дв}$ — число оборотов шкива электродвигателя;
k — коэффициент проскальзывания ремня, обычно принимаемый 0,98.

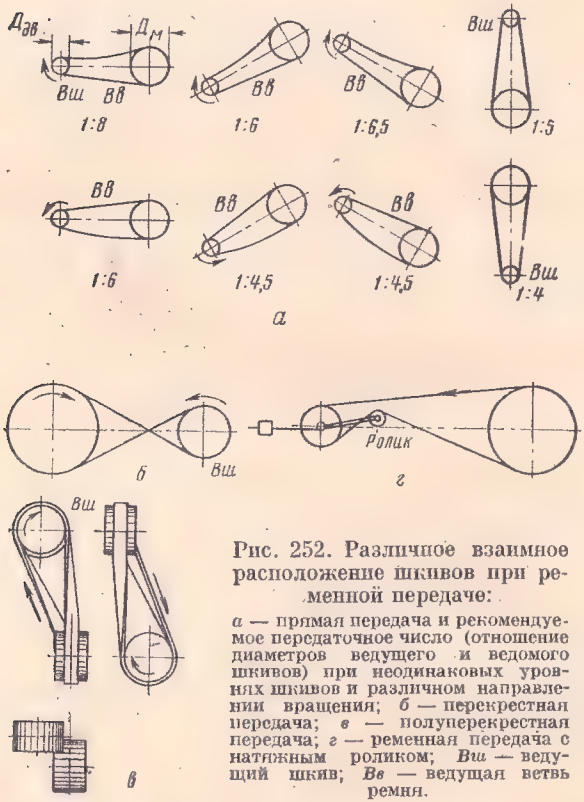


Рис. 252. Различное взаимное расположение шкивов при ременной передаче:

а — прямая передача и рекомендуемое передаточное число (отношение диаметров ведущего и ведомого шкивов) при неодинаковых уровнях шкивов и различном направлении вращения; *б* — перекрестная передача; *в* — полуперекрестная передача; *г* — ременная передача с натяжным роликом; *Вш* — ведущий шкив; *Вв* — ведущая ветвь ремня.

Передаточное число для ременной передачи может зависеть от взаимного расположения ведущего и ведомого шкивов. На рисунке 252, *а* изображены открытые передачи, при которых ремень находится в одной плоскости, а шкивы вращаются в одном направлении. У каждой передачи указано максимальное целесообразное отноше-

ние диаметров шкивов двигателя и машины. На рисунке 252, *б* представлена передача, при которой ведущая и ведомая ветви ремня перекрещиваются и ведомый шкив вращается в направлении, обратном ведущему. Рекомендуемое передаточное число в данном случае — от 1 : 6 до 6 : 1. На рисунке 252, *в* представлена полуперекрестная передача, при которой оси валов расположены под углом. Вращение шкивов — в одном направлении. В этом случае передаточное число должно быть равно от 1 : 3 до 3 : 1.

При использовании натяжных роликов (рис. 252, *г*), которые увеличивают угол охвата, передаточное число можно довести до 1 : 10 (или 10 : 1).

Расстояние между шкивами может достигать 8 *м*, в зависимости от ширины ремня и диаметров шкивов.

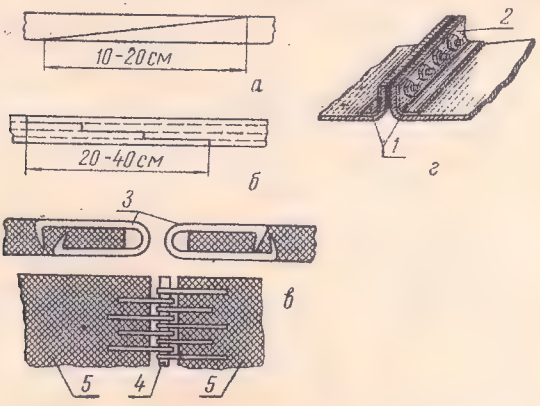


Рис. 253. Склейка кожаного (*а*) и прорезиненного (*б*) ремней и механическое соединение ремней гребешком (*г*) и проволочными крючками (*в*):

1— закругленные угольники; *2*— болтики с гайками; *3*— крючки; *4* — стальная ось; *5*— концы ремня.

Ременные передачи находят применение для передачи мощностей от 1 до 40 *квт* при скорости ремня от 5 до 25 *м/сек*.

Большое значение имеет правильная сшивка ремней. Кожаные и прорезиненные ремни лучше всего склеивать. Кожаные ремни следует соединять косой склейкой, а прорезиненные ремни — ступенчатой (рис. 253, *а* и *б*).

На рисунке 253 показаны металлические соединения концов ремня «гребешком» (*в*) с помощью закругленных угольников и болтиков и шарнирное с помощью проволочных крючков (*г*). Сшивают ремни сыромятными ремнями и жильными нитями.

При сшивке плоского ремня следует следить за тем, чтобы ремень в работе был правильно натянут. Если он будет перетянут, то двигатель может оказаться перегруженным. Если ремень будет иметь правильное натяжение, но его сшивка окажется выполненной небрежно, то при прохождении этой сшивки по шкиву двигатель будет притормаживаться. Это, в свою очередь, вызовет толчки тока в линии и колебание напряжения. В конечном счете плохая сшивка ремня окажется причиной мерцания электрических ламп у потребителей, расположенных недалеко от двигателя с небрежно выполненной ременной передачей.

К л и н о р е м е н н а я передача применяется для передачи мощностей до нескольких сотен *квт*. Она обеспечивает более спокойную работу двигателя вследствие отсутствия сшивки. Клиновые ремни выполняются только стандартной длины и сечения из нескольких слоев прорезиненной ткани. Недостатки клиноременной передачи — меньший срок службы ремней и большая стоимость шкивов.

У з у б ч а т ы х передач, которые составляются из пар цилиндрических или конических шестерен, передаточное число редко бывает более 11,5.

Ф р и к ц и о н н а я передача предназначается для передачи вращательного движения с постоянным или переменным отношением угловых скоростей путем непосредственного прижатия звеньев. По виду соприкасающихся звеньев различают цилиндрические, конические, сферические передачи. Применяются они в специальных устройствах, в которых требуется плавная регулировка скорости вращения.

Ч е р в я ч н а я передача позволяет передавать вращение под углом 90°. Передаточное число может доходить до 80, а в малонагруженных — до 300 и более. Основной недостаток — низкий к. п. д.

Ц е п н а я передача передает вращение при помощи закрепленных на валах звездочек, через которые перекинута бесконечная цепь. Обеспечивается точное постоян-

ство передаточного числа при значительном расстоянии между валами (до 8 *м*).

В ряде случаев целесообразно применять двигатели с пристроенными редукторами (двигатель-редуктор). Для сельскохозяйственных потребителей разработаны двигатель-редукторы мощностью от 0,6 до 4,5 *квт* и числом оборотов на выходном валу от 45 до 550 в минуту.

§ 4. Основные указания по установке электродвигателя

Двигатели средней и малой мощности устанавливают на фундаментах. Небольшие по мощности двигатели можно устанавливать также на кронштейнах на стене, потолке и т. д. Фундаменты ставят из кирпича и бетона. Для кирпичных фундаментов в качестве раствора применяют смесь из 1 части цемента и 3 частей чистого песка. Схватывание кирпичного фундамента длится 5—7 дней. Для бетонного фундамента применяется состав из портланд-цемента, речного песка и мытого гравия в объемном отношении 1 : 3 : 5. До начала монтажа фундамент должен простоять не менее 10 дней. Для отверстий фундаментных болтов необходимо устанавливать деревянные конические пробки, которые вынимают через 15—20 часов после окончания кладки бетона. Позже их трудно извлечь. Фундаментные болты заливают жидким цементным раствором после выверки машины. Этот раствор состоит из 1 части портланд-цемента и 1 части песка.

Перед укреплением двигателя ватерпасом выверяют горизонтальное положение салазок на фундаменте. Выравнивание достигается подколачиванием железных клиньев между нижней плоскостью салазок и самим фундаментом. Деревянные клинья применять нельзя, так как они сильно деформируются при завинчивании болтов и могут нарушить правильность выверки.

После установки и укрепления салазок приступают к выверке валов двигателя и трансмиссии (или станка). Валы должны быть параллельны друг другу, а середины шкивов находиться в одной плоскости. Если ширина шкивов одинакова, то параллельность валов можно проверить по боковым плоскостям шкивов (они должны находиться в одной плоскости). Конец шнура прикрепляют у шкива рабочей машины так, чтобы он касался

края обода, и прикладывают к краю шкива двигателя (рис. 254, *а*). Если валы параллельны, то шнур при натягивании и постепенном его подведении к шкиву двигателя должен касаться одновременно четырех точек: *1*, *2*, *3*, *4*. При различной ширине шкивов находят их сере-

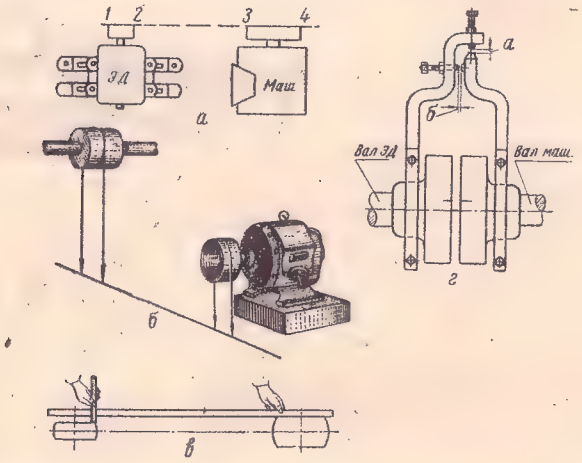


Рис. 254. Выверка правильности взаимного расположения шкивов электродвигателя и рабочей машины:

а — при одинаковой ширине ведущего и ведомого шкивов; *б* — при разном уровне расположения шкивов; *в* — при разной ширине шкивов; *г* — выверка валов двигателя и машины при соединении их муфтой при помощи центровочных скоб.

дины путем измерения и прочерчивают острым концом мела среднюю линию на обоих шкивах. Затем на эти прочерченные линии накладывают шнур — он должен совпадать с линиями, или поступают, как показано на рисунке 254, *б*. При небольшом расстоянии между двигателем и машиной выверку можно сделать при помощи линейки (рис. 254, *в*).

Параллельность осей шкивов достигается перемещением двигателя на салазках. После всех выверок его установку окончательно проверяют по ватерпасу и салазки заливают цементом. Закрепляют двигатель на салазках при надетом на шкив двигателя ремне.

При выверке валов электродвигателя и машины при их соединении муфтами напрямую пользуются вспомогательными скобами (рис. 254, *г*), которые закрепляют на валах двигателя и машины. Поворачивая валы двигателя и машины в одном направлении и пользуясь подкладками из жести и полосового железа, добиваются, чтобы расстояния *а* и *б* между скобами оставались одинаковыми в любом положении валов.

Шкив снимают специальными стягивающими приспособлениями — съемниками (рис. 255, *а*). Для снятия шариковых и роликовых подшипников применяются съемники подшипников (рис. 255, *б*). На рисунке 255, *в* показано, как правильно надевать подшипники на вал.

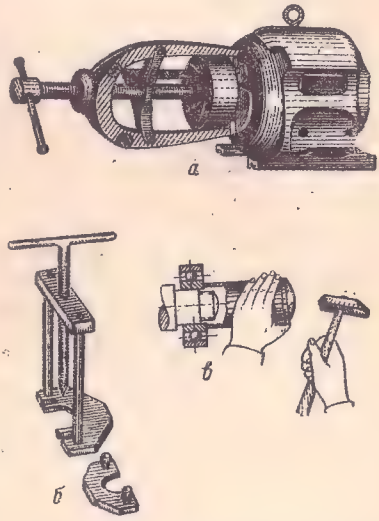


Рис. 255. Приспособление для снятия шкива и подшипника с вала электродвигателя и установки подшипника:
а — снятие шкива с вала двигателя при помощи универсального съемника; *б* — съемник для подшипников; *в* — посадка подшипников на вал.

§ 5. Выбор электродвигателя по конструктивному исполнению

В зависимости от характера среды, в которой предстоит работать двигателю, изготавливают двигатели различного исполнения: 1) открытые; 2) защищенные, или полузакрытые; 3) закрытые (закрытые негерметически, закрытые герметически и закрытые взрывобезопасные).

По способу охлаждения различают двигатели: 1) с естественным охлаждением; 2) с самовентиляцией (крыльчатка на роторе); 3) с наружной самовентиляцией (крыльчатка на конце вала снаружи) и с охлаждающим кожухом; 4) с посторонним охлаждением (по трубам от постороннего вентилятора).

В соответствии с руководящими указаниями по устройству электротехнических установок сельскохозяй-

ственного назначения в зависимости от характера помещения рекомендуется использовать следующие двигатели.

1. В помещениях заведомо сухих (жилых помещениях и домах городского типа) и сухих (конторах, домах колхозников, общежитиях, общественных помещениях, отапливаемых мастерских), где нет опасности попадания брызг и стружек на электродвигатель, рекомендуется использовать двигатель защищенного исполнения типа А2.

2. В сырых и неотапливаемых помещениях: коридорах, кухнях, столовых, сельских магазинах, сараях, складах, гаражах и т. д. рекомендуется использовать защищенный двигатель типа А2 с противосыростной изоляцией. Допускается также использовать защищенный тип А2 без противосыростной изоляции.

3. В особо сырых помещениях — банях, прачечных, кормохранилищах, тамбурах в скотных помещениях, неотапливаемых помещениях кормоприготовительных цехов, насосных станциях с установкой двигателей в специальных помещениях — рекомендуется использовать закрытый двигатель типа АО2 с противосыростной изоляцией.

4. В помещениях, содержащих пары аммиака, конюшнях, скотных дворах, телятниках, навозохранилищах и др. рекомендуется использовать двигатели закрытого исполнения АО2 с противоаммиачной изоляцией. Допускается использовать двигатели типа А2 с противосыростной изоляцией.

5. В помещениях, опасных в пожарном отношении, сушилках, овинах, мельницах нетоварного типа, сенных и молотильных сараях — закрытый типа АО2. Допускается использовать защищенный двигатель типа А2, если двигатель помещен в вентилируемой будке из материалов, защищенных от воспламенения. При отсутствии вентиляции будку следует выполнить объемом не менее 20-кратного объема электродвигателя.

6. На открытом воздухе рекомендуется защищенный двигатель типа А2 с противосыростной изоляцией. Допускается защищенный обычный А2.

7. В помещениях, где имеется опасность взрыва,— нефтехранилищах, пыльных помещениях для размола муки, люцерны, в помещениях с трепальными машинами для обработки льна и др. рекомендуется использовать закрытый взрывобезопасный двигатель.

Все перечисленные выше двигатели в основном отличаются условиями вентиляции. Условия охлаждения влияют на размер двигателя. Так, двигатель закрытого типа мощностью 3 *квт* без вентиляции в 2,5 раза тяжелее такого же двигателя с вентиляцией (охлаждающий кожух) и почти в 3 раза тяжелее двигателя открытого типа той же мощности. С увеличением мощности это различие еще более возрастает. Поэтому необходимо обеспечивать хорошую вентиляцию, периодически продувать поверхность двигателя от пыли. Иногда в практике двигатель при работе закрывают кустарным образом чехлами от пыли и брызг. Нужно помнить, что из-за ухудшения теплоотдачи мощность двигателя, которую он может отдать, уменьшается в 2—3 раза.

Глава XXIV

Схемы автоматического управления электроприводами

§ 1. Виды схем автоматики и условные обозначения на схемах

Электрические схемы соединений электроприводов разделяются на два вида: принципиальные и монтажные. Принципиальная схема показывает взаимную электрическую связь между элементами схемы, из нее можно выяснить последовательность срабатывания отдельных элементов схемы. Территориальное (взаимное) расположение отдельных элементов в схеме, размеры, тип и сечение проводов на принципиальных схемах не показывают. Принципиальные схемы могут быть разделены, в свою очередь, на свернутые и развернутые. Свернутая схема приведена на рисунке 164, *а*. На ней все элементы, принадлежащие магнитному пускателю, изображены объединенно. Та же схема в развернутом виде приведена на рисунке 256, *а*. Здесь элементы магнитного пускателя разобщены и помещены в той цепи, к которой они относятся по действию схемы. На этой схеме отдельно изображены главная (силовая) цепь двигателя и цепь управления (вспомогательная). Главная

цепь изображается обычно жирными линиями, а вспомогательная цепь — более тонкими. Принадлежность элементов схемы к отдельным аппаратам устанавливается по общему условному обозначению. Условные буквенные обозначения стандартизированы. Например, линейные

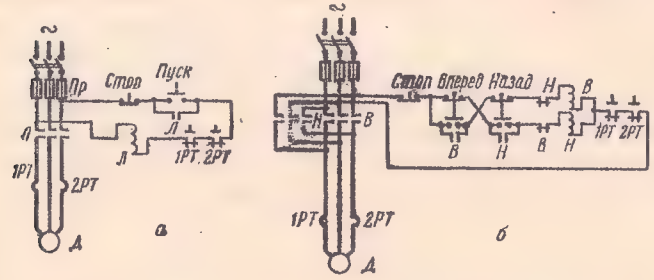


Рис. 256. Принципиальные развернутые электрические схемы управления электродвигателем при помощи нереверсивного (*а*) и реверсивного (*б*) магнитных пускателей:

В — элементы в цепи включения двигателя на вращение вперед; *Н* — элементы в цепи включения двигателя на вращение назад; *РТ* — тепловые реле.

контакторы обозначаются символом *Л* (*1Л*, *2Л* — первый линейный контактор, второй). Контакторы реверсивные «вперед», «назад» (рис. 256, *б*) обозначаются соответственно *В*, *Н* (*1В*, *2В*, *1Н*, *2Н* и т. д.); контакторы ускорения (рис. 257 и др.) — *1У*, *2У* и т. д.; контакторы торможения — *1Т*, *2Т*. Различные реле, в зависимости от их функций, обозначаются: *1РУ*, *2РУ*, *3РУ* — реле ускорения (первое, второе, третье); *РКС* — реле контроля скорости; *РТ* — реле тепловое; *РМ* — реле максимальное; *РВ* — реле времени; *РП* — реле промежуточное и т. д. Командо-аппараты обозначаются: *КУ* — кнопка управления; *КВ* — конечный выключатель; *ПВ* — путевой выключатель; *КК* — командо-контроллер и т. д.

Если в схеме управления используются контроллеры, то к схеме прилагается таблица, в которой указаны, какие контакты аппарата включены при данном положении контроллера.

На принципиальных схемах все контакты аппаратов показывают в нормальном положении, то есть при отсут-

ствии электрического или механического воздействия на элементы аппарата.

Монтажная схема предназначается для использования при монтаже, поэтому она является рабочим чертежом схемы. Аппараты и приборы на этой схеме располагают соответственно их размещению в электроустановке. Их обозначают полными символами. Соблюдать масштаб не обязательно. Для проводов указывают их число, марку и сечение. Монтажные схемы электроприводов называют также схемами внешних соединений.

В зависимости от аппаратуры, которая применяется для автоматизации электропривода, различают: релейно-контакторную автоматику (для управления используют контакторы, реле, командо-аппараты), электромашинную автоматику (для управления используют электромашинные усилители), электронную автоматику (для управления используют электронные и ионные аппараты).

В электрических схемах автоматического управления приняты стандартные изображения элементов и аппаратов (табл. 42).

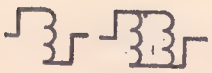
§ 2. Типовые схемы управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем

На рисунке 256, *а* приведена принципиальная развернутая схема пуска и остановки электродвигателя с короткозамкнутым ротором при помощи нереверсивного магнитного пускателя. Двигатель включается линейным контактором *Л*, главные контакты которого находятся в силовой цепи электродвигателя. При нажатии кнопки *Пуск* катушка контактора *Л* оживляется током и замыкает контакты в силовой цепи. Одновременно замыкается блокировочный замыкающий контакт *Л* и шунтирует кнопку *Пуск*. Поэтому при отпускании кнопки *Пуск* двигатель не отключается, а продолжает работать.

При нажатии кнопки *Стоп* двигатель остановится. В случае перегрузки электродвигателя разомкнутся размыкающие контакты тепловых реле *РТ*. Электродвигатель будет также отключен, если напряжение в сети (а следовательно, и на катушке *Л*) снизится до величины менее $0{,}85U_{н}$. От коротких замыканий двигатель защищен предохранителями *Пр*. Тепловые реле настраивают обычно на ток перегрузки в пределах 10—20% выше номинального.

Таблица 42

Некоторые условные обозначения в цепях автоматического управления

Изображение	Наименование
	а) Катушка контактора, б) две катушки, включенные параллельно
	Катушка напряжения реле
	Катушка токовая реле
	Нагревательный элемент теплового реле
	Контакт замыкающий
	Контакт размыкающий
	Контакт остающийся, с ручным возвратом, замыкающий
	Контакт остающийся, с ручным возвратом, размыкающий
	Контакт замыкающий с выдержкой времени при замыкании

Продолжение

Изображение	Наименование
	Контакт замыкающий с выдержкой времени при размыкании
	Контакт замыкающий с выдержкой времени при замыкании и размыкании
	Контакт размыкающий с выдержкой времени при замыкании
	Контакт размыкающий с выдержкой времени при размыкании
	Контакт размыкающий с выдержкой времени при замыкании и размыкании
	Кнопка с самовозвратом с замыкающим контактом
	Кнопка с самовозвратом с размыкающим контактом
	Кнопка с самовозвратом с одним замыкающим и одним размыкающим контактами
	Выключатель путевой или конечный замыкающий
	Выключатель путевой или конечный размыкающий

На рисунке 256, *б* представлена схема пуска, остановки и изменения направления вращения короткозамкнутого электродвигателя при помощи реверсивного магнитного пускателя. При нажатии кнопки *Вперед* оживляется током катушка контактора *В* и замыкаются контакты *В* в силовой цепи электродвигателя. Двигатель включен. Одновременно замыкается замыкающий блокировочный контакт *В*, блокирующий кнопку *Вперед*, и размыкается размыкающий контакт *В* в цепи катушки *Н*. Этот контакт также является блокировочным. Он, как и размыкающий контакт *Н*, предотвращает одновременное включение обоих контакторов, ибо в противном случае произойдет короткое замыкание в силовой цепи. При нажатии кнопки *Назад* размыкается цепь катушки *В*, и в момент, когда контактная система контактора *В* возвратится в нормальное положение, вернется в нормальное замкнутое состояние и размыкающий контакт *В*. Таким образом, окажется замкнутой цепь катушки контактора *Н*. Замкнутся силовые контакты *Н*. Двигатель резко затормозится и начнет вращаться в обратную сторону. В случае перегрузки двигателя цепь катушек *В* и *Н* будет разомкнута контак-

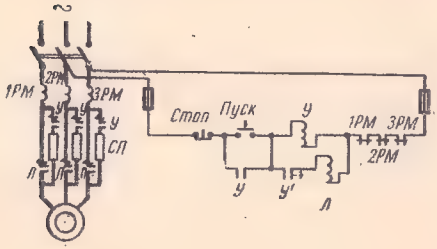


Рис. 257. Схема пуска короткозамкнутого электродвигателя с пусковым сопротивлением СП.

тами теплового реле *РТ*. Останавливают двигатель нажатием кнопки *Стоп*.

Некоторые реверсивные магнитные пускатели снабжаются только механической блокировкой, которая не позволяет включиться одновременно обоим контакторам.

При реверсировании двигателей с большими маховыми моментами следует сначала остановить двигатель нажатием кнопки *Стоп*, а затем включить его на обратное направление вращения.

При пуске асинхронных короткозамкнутых двигателей большой мощности для снижения пусковых токов применяют схемы пуска при пониженном напряжении. На рисунке 257 представлена схема пуска короткозамкнутого двигателя с пусковым сопротивлением *СП*. При нажатии кнопки *Пуск* оживляется током катушка контактора *У*. Главные контакты этого контактора включают статорную обмотку двигателя в сеть через пусковые сопротивления *СП*. Одновременно приводится в действие маятниковое реле времени *У*. Через некоторое время маятниковое реле замыкает свои контакты и катушка контактора *Л* оживляется током; главные контакты *Л* шунтируют пусковое сопротивление *СП*.

Для снижения пускового тока применяется и схема автотрансформаторного пуска короткозамкнутых двигателей большой мощности (рис. 258).

При нажатии кнопки *Пуск* оживляется током катушка контактора *У* и катушка реле управления *РУ*. Главные контакты контактора *У* включают автотрансформатор *АТ*. Двигатель разгоняется при пониженном напряжении.

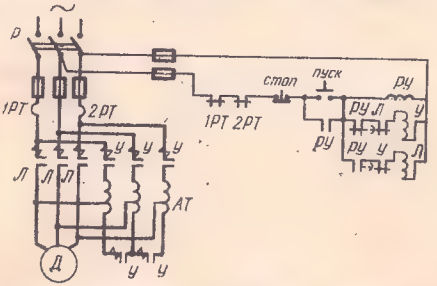


Рис. 258. Схема с автотрансформаторным пускателем короткозамкнутого электродвигателя.

Спустя некоторое время размыкающие контакты реле *РУ* размыкаются, а замыкающие — замыкаются. При этом обесточивается катушка контактора *У* (отключается автотрансформатор *АТ*) и оживляется током катушка контактора *Л*. Двигатель продолжает разбегаться при полном напряжении сети.

§ 3. Типовые схемы управления электродвигателем с фазным ротором

В схемах управления двигателем с фазным ротором необходимо шунтировать секции сопротивления пускового реостата в соответствии с заданными условиями. Напри-

мер, секции реостата нужно шунтировать через определенные промежутки времени (управление в функции времени), а также при снижении пускового тока до определенной величины (управление в функции тока), при достижении заданной скорости вращения, пути перемещения груза и т. д.

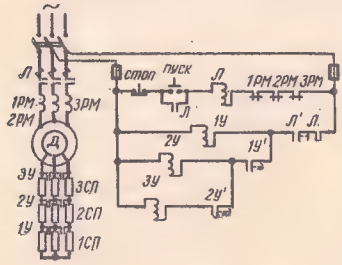


Рис. 259. Схема управления электродвигателем с фазным ротором в функции времени.

Рассмотрим некоторые из схем управления электродвигателем с фазным ротором.

На рисунке 259 представлена схема управления двигателем с фазным ротором в функции времени. При нажатии кнопки *Пуск* оживляется током катушка контактора *Л*. Силовые контакты *Л* включают статорную обмотку двигателя в сеть. Одновременно начинает работать маятниковое реле времени *Л'*, пристроенное к контактору. Через заданный промежуток времени реле замыкает свой контакт и включает катушку контактора *1У*. Силовые контакты *1У* закорачивают первую ступень реостата *1СП*. Одновременно начинает работать пристроенное к контактору *1У* маятниковое реле времени *1У'*, которое через некоторое время замыкает цепь катушки контактора *2У*. При этом шунтируется вторая ступень реостата *2СП* и включается реле времени *2У'* и т. д.

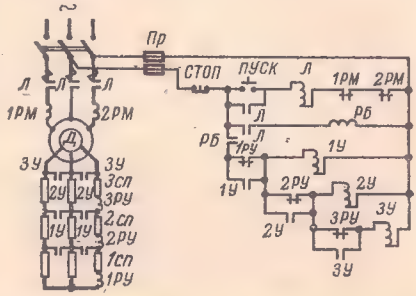


Рис. 260. Схема управления двигателем с фазным ротором в функции тока.

На рисунке 260 представлена схема управления электродвигателем с фазным ротором в функции тока. Токовые реле ускорения *1РУ*, *2РУ*, *3РУ*, катушки которых включены в цепь ротора, настроены таким образом, чтобы токи, при которых реле срабатывают,

удовлетворяли неравенству

$$I_{1РУ} > I_{2РУ} > I_{3РУ}.$$

При нажатии кнопки *Пуск* оживляется током катушка контактора *Л*, замыкаются главные контакты контактора *Л* и два блокировочных контакта *Л* в цепи управления. Один из них шунтирует кнопку *Пуск*, а другой включает катушку реле *РБ*. Двигатель разгоняется, а реле *РБ* замыкает свой замыкающий контакт *РБ* и подсоединяет, таким образом, к сети цепь катушек контакторов ускорения. В первый момент пуска, когда ток в цепи ротора, а следовательно, и в цепи катушки реле ускорения *1РУ* велик, реле *1РУ* удерживает размыкающий контакт *1РУ* в разомкнутом состоянии, и катушка контактора ускорения *1У* не оживлена током. При снижении пускового тока до установленной величины отключения реле *1РУ* его размыкающий контакт возвращается в замкнутое положение и замыкает катушку контактора ускорения *1У*. Силовые контакты этого контактора шунтируют первую ступень пускового сопротивления *1СП*. Двигатель продолжает разгоняться при двух ступенях пускового реостата до тех пор, пока не снизится ток в обмотке реле *2РУ* до величины, при которой реле не удержит более в разомкнутом состоянии размыкающий контакт *2РУ*. При его замыкании происходит включение катушки контактора и шунтирование второй ступени пускового реостата *2СП* и т. д. Замыкающие блок-контакты *1У*, *2У*, *3У* исключают вибрирование, а следовательно, подгорание контактов *1РУ*, *2РУ* и *3РУ* при токах в катушках реле ускорения, близких к токам уставок.

Защита двигателя осуществляется двумя реле максимального тока *РМ*. Цепь управления защищается предохранителями *Пр*.

На рисунке 261 приведена схема управления электродвигателем с фазным ротором в функции времени с торможением противовключением. Управление осуществляется при помощи командо-контроллера *КК*. При нейтральном положении командо-контроллера замкнуты контакты *1*. Катушка реле напряжения *РН* оживлена током, и при переключении командо-контроллера на другие положения эта катушка остается включенной через цепь самоподпитки с нормально открытым контактом *РН*. Назначение этого реле — защищать двигатель от снижения на-

пряжения и самопроизвольного дальнейшего пуска (при положении контроллера *Вперед* или *Назад*).

При переводе командо-контроллера из нейтрального положения в положение *Вперед* (*В*) включаются контактор *В* и блокировочное реле *РБ*. Реле *РБ* включает

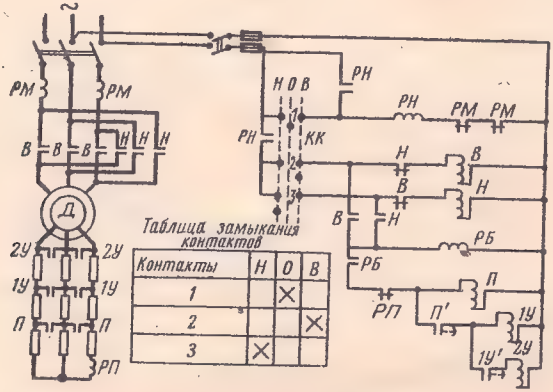


Рис. 261. Схема управления двигателем с фазным ротором в функции времени с торможением противовключением и диаграмма командо-контроллера.

катушку кантактора противовключения *П*. Замыкаются силовые контакты *В* и контакты *П* в цепи пускового сопротивления, и двигатель разгоняется при двух ступенях пускового сопротивления. Катушка реле противовключения *РП* настроена таким образом, что реле возбуждается и срабатывает при токе, большем, чем пусковой ток в цепи ротора. Следовательно, размыкающие контакты *РП* остаются замкнутыми при пуске. При оживлении током катушки контактора *П* начинает работать пристроенное реле времени *П'*, которое через некоторое время замыкает свои контакты в цепи катушки контактора ускорения *1У*. Силовые контакты этого контактора шунтируют одну ступень пускового реостата. Одновременно с оживлением током катушки *1У* начинает работать маятниковое реле времени *1У'*, и через некоторое время срабатывает контактор *2У*, силовые контакты которого шунтируют вторую ступень пускового реостата.

При установке командо-контроллера в положение

Назад включается контактор *Н*, и электродвигатель тормозится противовключением. Так как в режиме противовключения ток в цепи ротора будет примерно в 2 раза больше, чем при пуске, то катушка реле *РП* возбуждается и открывает свой размыкающий контакт *РП*. При этом размыкается цепь контакторов ускорения *1У* и *2У* и противовключения *П*. В цепи ротора ток ограничивается всеми ступенями сопротивлений.

Реле блокировочное *РБ* имеет выдержку времени срабатывания больше, чем время срабатывания реле *РП*. Поэтому в самый момент противовключения катушка контактора *П* не получает питания, так как до момента срабатывания реле *РБ* успевают разомкнуться размыкающие контакты *РП*.

На рисунке 261 приведена также диаграмма командоконтроллера *КК*. На ней указано, какие контакты замкнуты при различных положениях рукоятки командоконтроллера.

§ 4. Управление электродвигателями в заданной последовательности

Запуск двигателей в заданной последовательности обеспечивается электрической блокировкой в электроприводах. Определенная последовательность в пуске и остановке электродвигателей и рабочих механизмов необходима в установках, связанных между собой общим технологическим процессом, чтобы соблюсти непрерывность действия технологического потока и предупредить аварию. В сельском хозяйстве к таким технологическим процессам могут быть отнесены зерноочистка, сортировка, кормоприготовление и др.

На рисунке 262, *а* приведена схема блокировки двух электродвигателей, обеспечивающая заданную последовательность пуска и остановки. Схема исключает возможность пуска электродвигателя $Д_2$, прежде чем запущен двигатель $Д_1$. Для этой цели в цепи управления $Д_2$ включены замыкающие контакты *1Л*, связанные с контактором электродвигателя $Д_1$. Если $Д_1$ остановится, то автоматически остановится и $Д_2$. Такая последовательность включения необходима, например, при транспортировке зерна на зерноочистительном пункте. Для предотвращения завала зерна запускают $Д_1$ на приводе горизон-

тального транспортера, а затем включают $Д_2$ на приводе вертикального транспортера, который подает зерно на горизонтальный транспортер и далее в бункер. Для самостоятельного включения $Д_2$ следует замкнуть рубильник $Р$.

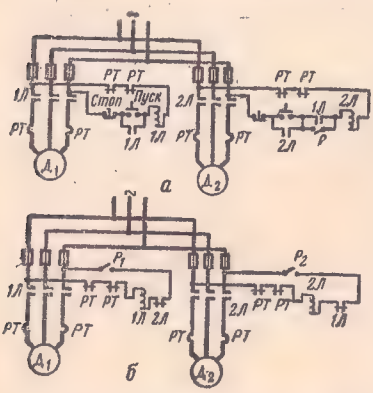


Рис. 262. Схемы блокировки двух электродвигателей при обеспечении заданной последовательности включения (*а*) и блокировки рабочего и резервного электродвигателей (*б*).

На рисунке 262, *б* представлена схема блокировки рабочего и резервного электродвигателей. Один из двигателей (рабочий или резервный) включают рубильником $Р_1$ или $Р_2$. Однако, если один из двигателей включен, второй включиться не может, так как в цепи управления каждого из двигателей установлен нормально замкнутый контакт контактора другого двигателя. Если требуется заменить двигатель, то следует выключить рубильник у работающего двигателя и включить у другого.

По аналогичной схеме включаются насосные агрегаты (рабочий и аварийный) на насосных станциях.

§ 5. Технологические датчики и их использование для автоматического управления сельскохозяйственными установками

Для автоматического управления электрифицированными технологическими процессами в сельскохозяйственном производстве используются технологические датчики для включения и выключения магнитного пускателя, контактора или другого типа электромагнитного выключателя.

Полностью автоматизированная электроустановка составляется из ряда элементов, выполняющих определенные функции. Рабочими элементами в электрических схемах являются электродвигатель, нагревательный прибор, источник света и т. д. Рабочий элемент

схемы включается и выключается исполнительным элементом, в качестве которого используются магнитный пускатель, контактор или другой аппарат. В цепи управления исполнительного элемента в полностью автоматизированных схемах устанавливаются контакты технологического датчика, который следит за ходом технологического процесса и в определенное время замыкает или размыкает цепь управления исполнительным элементом. В некоторых случаях при недостаточной мощности контактов датчика между датчиком и исполнительным элементом включается промежуточное реле.

В зависимости от характера автоматизируемой установки датчики следят за уровнем жидкости (например, при автоматизации процессов, связанных с перекачкой жидкости, водокачек), окружающей температурой и влажностью (при автоматизации процессов нагрева, охлаждения и увлажнения), промежутком времени или расписанием включения и выключения электроустановки, весом, местоположением груза, степенью заполнения бункера и т. д.

Датчик воспринимает изменение контролируемого параметра и преобразует его в электрический импульс. Ниже приведены некоторые принципиальные схемы устройства датчиков и схем автоматического управления.

Автоматизация водокачек основана на использовании различных датчиков уровня. Простейший датчик уровня — поплавковое реле (рис. 263, *а*). Поплавок сопровождает уровень воды в водонапорном баке при помощи перемычки *П*, при достижении нижнего заданного уровня включает насосный агрегат нажатием на кнопку *Пуск*, а при достижении верхнего уровня (этот момент изображен на рис. 163, *а*) нажатием на кнопку *Стоп* отключает насосный агрегат. Это простейшая схема, которая может быть выполнена электромонтером в условиях колхоза или совхоза.

На рисунке 263, *б* представлены электродный датчик уровня и схема его включения. В целях безопасности напряжение на датчике — 36 *в*. Контакты *1* и *2* промежуточного реле включают и отключают катушку магнитного пускателя насосного агрегата. При заполнении бака водой до уровня электрода *III* размыкающие контакты *1* и *2* держат насосный агрегат во включенном состоянии. При

погружении электрода *III* в воду замыкается цепь с электродом *I* и оживляется током катушка реле *ПР*, размыкаются контакты *1* и *2* и замыкаются контакты *3* и *4* подпитки промежуточного реле через электрод *II* нижнего заданного уровня. Промежуточное реле будет включено

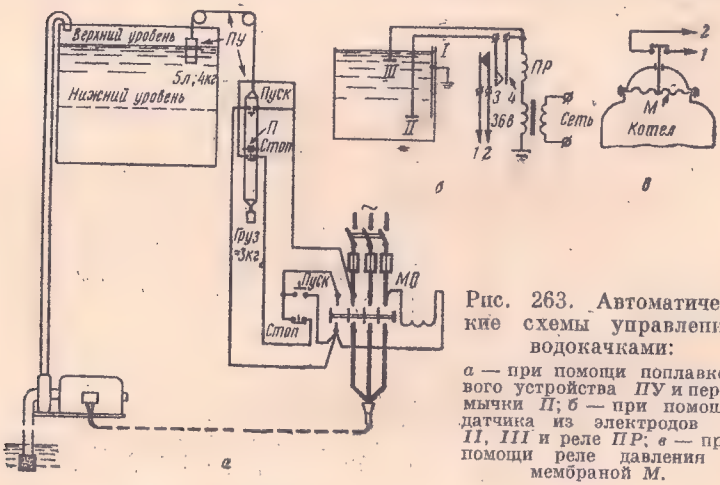


Рис. 263. Автоматические схемы управления водокачками:

а — при помощи поплавкового устройства *ПУ* и перемычки *П*; *б* — при помощи датчика из электродов *I*, *II*, *III* и реле *ПР*; *в* — при помощи реле давления с мембраной *М*.

до тех пор, пока уровень воды не снизится ниже уровня электрода *II*, то есть обесточится катушка промежуточного реле *ПР* и размыкающие контакты этого реле *1* и *2* снова включат насосный агрегат.

В безбашенных водокачках с воздушно-водяным котлом в качестве датчика используется реле давления (рис. 263, *в*). При снижении уровня воды в котле уменьшается давление воздуха на мембрану реле *М* и контакты реле *1* и *2* замыкаются, электронасосный агрегат включается. При наполнении котла давление в нем растет и контакты размыкаются.

Автоматическая водокачка ВЭ-2,5М с напорным котлом обладает тем преимуществом перед водокачкой с напорным баком, что для размещения напорного котла не требуется сооружения напорной башни, поэтому она значительно дешевле башенной.

Водокачка ВЭ-2,5М (рис. 264) состоит из воздушно-водяного котла *3* емкостью 0,95 *м*^{3}, вихревого насоса *4* типа 1,5В-1,3 или 2ЛК-25-10, электродвигателя *5* типа

А42/4 на 1,7 *квт* и реле давления *2*. В комплект водокачки также входят: приемный клапан *6*, всасывающий и нагнетающий трубопроводы, станция управления *1*.

Водокачка работает следующим образом. Вода сначала подается к потребителю под давлением в воздушно-водяном котле. Это давление может иметь величину до

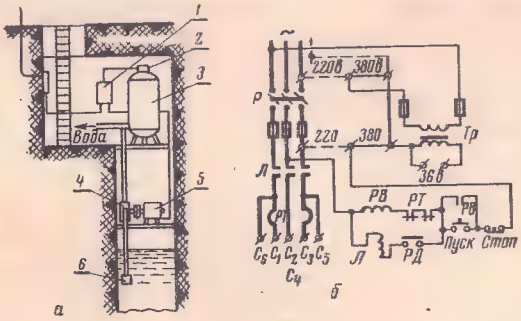


Рис. 264. Безбашенная водокачка типа ВЭ-2, 5М:
а — общий вид установки; *б* — схема автоматического управления водокачкой; *1* — станция управления; *2* — реле давления; *3* — котел; *4* — насос; *5* — двигатель; *6* — всасывающий клапан; *РД* — контакты реле давления; *Тр* — осветительный трансформатор 220/36 *в*.

5 атмосфер (1 атмосфера = 10,33 *м* водяного столба). По мере расхода воды из котла давление в нем падает до тех пор, пока контакты манометрического реле давления *РД* не замкнут цепь катушки магнитного пускателя *Л*. Включается электродвигатель насосного агрегата, вода подается непосредственно потребителю, а излишки воды поступают в котел. По мере наполнения котла водой в нем снова повышается давление до известного предела, при котором размыкаются контакты *РД* и выключается электронасос.

У двигателей, приводящих в действие насосы, а также у вентиляторов необходимо обеспечивать защиту от возможной потери одной из фаз сети. При обрыве одной из фаз (или перегорании предохранителя) две другие фазы обмотки двигателя, приводящего в действие насос (или вентилятор), потребляют ток, на 25—50% больший номинального. Такое увеличение тока в большинстве случаев не может вызвать перегорания предохранителя в од-

ной из двух оставшихся фаз. Обмотка двигателя перегревается, и изоляция сгорает.

В схеме водокачки ВЭ-2,5М для защиты от повышенного тока используются тепловые реле *РТ*, настроенные на размыкание цепи катушки магнитного пускателя при увеличении тока на 10—20%. Нагревательные элементы реле *РТ* включены на фазный ток. Поэтому при включении двигателя по схеме треугольник концы обмоток следует присоединять к соответствующим зажимам станции управления (рис. 264, *б*). Схема станции управления включается в сеть поворотом ручки пакетного выключателя *Р*. Затем кнопкой *Пуск* включают реле возврата *РВ*. Если при этом был замкнут контакт *РД* в реле давления, то включится магнитный пускатель *Л* и насос начнет подавать воду. При заполнении бака водой и увеличении давления воздушной подушки в котле реле давления разомкнет контакт *РД* и магнитный пускатель выключится. При перегрузке двигателя и срабатывании теплового реле отключится реле возврата *РВ*, и, следовательно, магнитный пускатель *Л*.

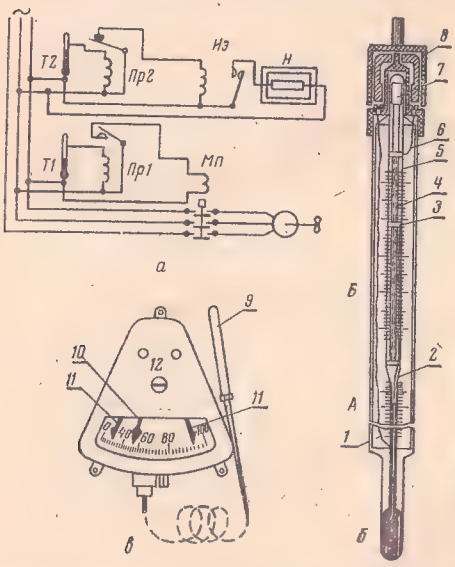


Рис. 265. Схема автоматического поддержания заданной температуры (*а*), контактный термометр (*б*) с подвижным контактом и термосигнализатор ТС (*в*):

1 — неподвижный контакт; *2* — проволочный подвижный контакт; *3*— передвижная муфта; *4* — ходовой винт; *5* — стеклянная трубка; *6*— впаянная проволока; *7*— стальной сердечник; *8*— подковообразный магнит; *9*— термобаллон; *10*—стрелка реле; *11*— установочные контакты; *12*— зажимы для подключения прибора к внешней цепи; *А* — измерительная шкала; *В* — настроечная шкала.

Все металлические части водокачки должны быть надежно заземлены.

Автоматизация электронагревательных установок. В качестве датчиков в схемах автоматического управления электронагревательными установками используются контактные термометры, терморегуляторы манометрического принципа действия, терморегуляторы биметаллические и т. д.

Контактные ртутные термометры используются совместно с промежуточными реле, которые служат для усиления мощности контактов. Ртутный столбик в капилляре термометра может выдержать ток не более 10—20 *ма*. Поэтому его нельзя включать непосредственно в цепь управления магнитного пускателя, которая потребляет ток в несколько сотен миллиампер.

На рисунке 265, *а* представлена схема управления установкой для поддержания режима температуры на заданном уровне. Термометр *Т1* при замыкании контакта (верхний уровень регулируемой температуры) включает промежуточное реле *Пр1*. Реле *Пр1*, в свою очередь, включает катушку магнитного пускателя *МП* привода вентилятора. При снижении температуры сначала размыкается контакт *Т1* и выключается вентилятор, а затем размыкается контакт в термометре *Т2*. Обесточивается катушка реле *Пр2*, и его размыкающий контакт включает нагревательный прибор *Н* через исполнительный элемент *Иэ*.

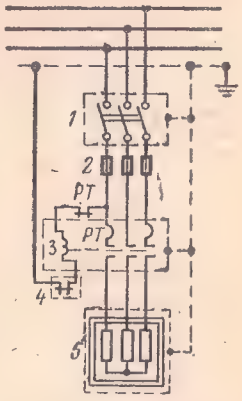


Рис. 266. Схема включения ВЭТ-200:
1— рубильник; *2*— предохранитель; *3*— пускатель; *4*— температурное реле; *5*— нагревательное устройство.

На рисунке 266 представлена схема автоматического управления водонагревателем-термосом ВЭТ-200, который выпускается для горячего водоснабжения животноводческих ферм. Емкость резервуара — 200 *л* (выпускаются также и на 400 *л*). Нагреватели — трубчатого типа с нихромовыми спиралями в талькошамотной изоляции. Температурное реле —с биметаллическим чувствительным элементом, который воздействует на ртутный прерыватель. Контакты температурного реле *4* включают и выключают катушку магнитного пускателя *3* автоматически.

Для регулирования влажности при заданной температуре (в инкубаторах) используются увлажненные контактные термометры (рис. 265, *б*).

Подвижный проволочный контакт *2* можно устанавливать на любом делении термометра вращением магнита *8*. Магнитное поле увлекает за собой сердечник *7*, который вращает винт *4*. Муфта *3*, поднимаясь или опускаясь по винту, перемещает контакт *2*.

Вместо контактного термометра в схемах регулирования температуры может быть использован термоэлектросигнализатор типа ТС-100 (до 100°) и др. Термосигнализатор (рис. 265, *в*) работает на манометрическом принципе. Термобаллон *9* заполнен жидкостью, имеющей большой коэффициент объемного расширения (например, лигроином). При увеличении окружающей температуры давление внутри баллона растет и манометрическое устройство поворачивает стрелку *10* прибора. Стрелка занимает положение на шкале прибора в соответствии с окружающей температурой (указана на шкале прибора). Стрелка снабжена электрическим контактом. На шкале устанавливаются (на требуемом уровне температур) неподвижные контакты *11*, замыкаясь или размыкаясь с которыми стрелка *10* включает или выключает цепи управления или сигнализации.

Биметаллический терморегулятор применяется до температуры 250°. Чувствительным элементом является биметаллическая пластина, закрепленная в держателе. При изменении окружающей температуры конец спирали или пластины поворачивается и замыкает (или размыкает) контакты в цепи управления.

На рисунке 267 приведены различные типы датчиков. В зависимости от характера технологического процесса этими датчиками могут быть контактные часы, электроконтактный манометр, датчик уровня сыпучих материалов, центробежное реле скорости и т. д.

Широкие возможности для автоматизации процессов сельского хозяйства открываются в связи с применением различных полупроводниковых материалов. Например, использование фотосопротивлений позволяет чрезвычайно просто выполнить различные командные схемы сигнализации, зажигания освещения при наступлении темноты, включения каких-либо приборов при подаче светового сигнала и т. д.

На рисунке 267, *е* представлена схема, иллюстрирующая применение фотосопротивлений *Фс*. Схема может быть использована для сигнализации, а также для включения того или иного механизма при освещении фотосопротивлений сильным световым лучом (например, механизм

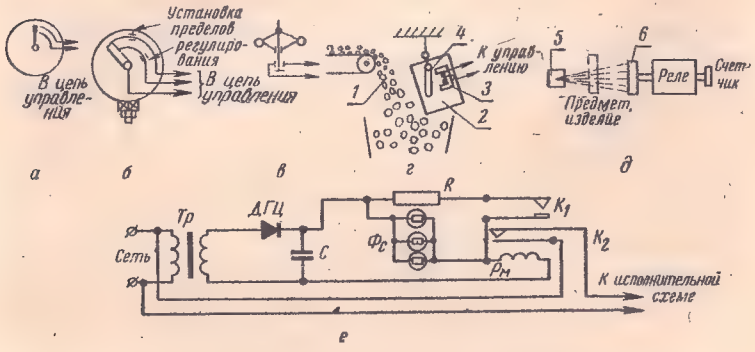


Рис. 267. Технологические датчики для схем управления:

а — контактные часы; *б* — контактный манометр; *в* — реле скорости; *г* — датчик наличия сыпучих материалов; *д* — радиоактивный датчик; *е* — схема включения фотореле; *1*— поток материала; *2*— поворотный кожух с электромагнитом *3*; *4*— неподвижный стальной сердечник, замыкающий магнитную цепь электромагнита *3* при отсутствии потока материала; *5* — источник ионизирующих излучений; *6* — счетчик ионизирующих излучений.

открытия ворот при подходе автомобиля и освещения фотоэлемента фарами и т. д.). Аналогичная по принципу действия схема может быть предназначена для включения и отключения электрического освещения.

Питание схемы, изображенной на рисунке 267, *е*, осуществляется от выпрямителя, собранного с трансформатором *Тр*, полупроводниковым диодом *Д* и конденсатором *С*. Полупроводниковое фотосопротивление *Фс* (при необходимости можно включить параллельно несколько фотосопротивлений) при освещении уменьшает свое внутреннее сопротивление. Ток через катушку *Рм* растет, и реле срабатывает. Сопротивление *R*, включаемое контактами $К_1$, служит для дополнительного питания катушки *Рм* и исключает искрение. Контакты $К_2$ реле *Рм* включают рабочую схему.

При автоматизации отдельных сельскохозяйственных процессов, например счета продукции, регулировки заполнения резервуаров сыпучими или жидкими материа-

лами и т. д., могут найти широкое применение радиоактивные изотопы. Для аналогичных целей изотопы используются в промышленности.

Радиоактивный датчик работает следующим образом (рис. 267, *д*). От источника бета- или гамма-излучений *5* лучи попадают на ионизационный счетчик *6*, включенный в схему реле. Если между источниками излучения и счетчиком радиоактивных частиц проходит предмет, который задерживает лучи, то схема срабатывает и счетчик регистрирует предмет.

Глава XXV

Использование электрического освещения в сельском хозяйстве

§ 1. Спектр электромагнитных колебаний. Основные светотехнические понятия

Электрическое освещение в сельском хозяйстве — широко распространенный вид использования электроэнергии. Электрическое освещение несет культуру в быт населения, позволяет сократить сроки выполнения сельскохозяйственных работ, делая возможной организацию их в ночное время. Рациональное освещение повышает производительность труда, улучшает качество продукции и увеличивает безопасность работы обслуживающего персонала. Правильное освещение уменьшает зрительное и общее утомление работника, способствует поддержанию чистоты и порядка в помещениях. Электрическое освещение приобретает все большее значение как производственный фактор для дополнительного освещения в теплицах при выращивании рассады, для увеличения продолжительности светового дня в птичнике. Использование электрического освещения наряду с использованием ультрафиолетового и инфракрасного облучения все более и более расширяется в животноводстве, растениеводстве и других отраслях сельскохозяйственного производства.

Световые лучи, как инфракрасные, ультрафиолетовые и др., являются разновидностью энергии электромагнитных колебаний. В общем спектре электромагнитных коле-

баний, который объединяет электричество в различных формах его проявления, на долю световых и примыкающих к ним инфракрасных и ультрафиолетовых лучей приходится весьма малый участок с длиной волны от десятых долей миллиметра до 50 ангстрем ($1 Å = 10^{-8}$ *см*). Солнце щедро снабжает нашу планету лучами, расположенными в этом диапазоне и оказывающими огромное влияние на жизнедеятельность растений и животных на земле.

Первой ступенью спектра электромагнитных колебаний является **постоянный** ток, число колебаний которого равно нулю. Далее идет **переменный** ток. Современная электротехника сильных токов использует постоянный и переменный токи с частотой до 400 *гц*. **Звуковые частоты**, следующие за промышленными частотами, используются в телефонии, так как, превращенные в колебания воздуха, они улавливаются на слух. Эти частоты используются также для индукционного нагрева металлов. Для этих же целей используются более высокие **радиочастоты** — до нескольких сотен килогерц. Звуковые колебания, лежащие вне предела слышимости человека (более 20 *кгц*), называются **ультразвуковыми** колебаниями или ультразвуком. Ультразвук находит все более широкое применение в технике. С его помощью осуществляют перемешивание растворов, очистку мелких деталей от металлических опилок, котлов от накипи, его используют в дефектоскопии, применяют в лечебной практике и т. д.

В лечебной практике используются также и **радиоволны**, которые дают равномерный прогрев тканей (диатермия), **рентгеновские** лучи для просвечивания. Радиовещание осуществляется на волнах от нескольких тысяч метров до нескольких метров. Эти волны хорошо распространяются в пространстве (в «эфире»). Телевидение осуществляется на метровых волнах.

Радиочастоты используются в технике также для диэлектрической (высокочастотной) сушки древесины и семян, дезинсекции зерна и т. д. Под действием сантиметровых и более коротких волн стимулируется энергия прорастания семян. Миллиметровые волны еще недостаточно хорошо изучены, так как еще не научились получать достаточно мощного их излучения.

Далее идут **инфракрасные** лучи, излучаемые нагретым телом. Инфракрасные лучи длиной волны от

3 до 0,76 *мк* глубоко проникают в живую ткань и равномерно ее прогревают. Максимум теплового излучения приходится на длину волны 1,4 *мк*.

Световые электромагнитные колебания воспринимаются глазом. Лучше всего воспринимаются глазом желто-зеленые лучи с длиной волны 0,55 *мк*. Световые лучи позволяют нам видеть мир и, кроме того, играют важную роль в фотосинтезе растений.

С коротковолновой стороны к световым лучам примыкают ультрафиолетовые лучи, имеющие огромное значение для всего живого на земле. Далее идут лучи Рентгена, гамма-лучи и всепроникающие космические лучи, изучение которых интенсивно продолжается в наше время.

Электромагнитные колебания распространяются со скоростью света $c=300$ тыс. *км/сек*. Скорость света c, число колебаний в секунду f и длину волны λ связывает между собой следующая простая формула:

$$c = f\lambda = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек},$$

или

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{f} \text{ см} = \frac{3 \cdot 10^{8}}{f} \text{ м}. \qquad (225)$$

В таблице 43 даны длины волн различных лучей от инфракрасных до рентгеновских. Видимость лучей с длиной волны 0,55 *мк* принимается равной единице. Плохо воспринимаются глазом красные и фиолетовые лучи. Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи глазом человека не воспринимаются. Инфракрасные лучи обнаруживаются по тепловому действию, а ультрафиолетовые — по люминесценции (свечению под их воздействием) различных материалов, по воздействию на биологические объекты и т. д.

В светотехнике используют следующие величины: световой поток, силу света, яркость, освещенность, светность.

Световой поток F *представляет собой меру мощности светового излучения, то есть видимого излучения, оцениваемого по световому ощущению, которое испытывает средний человеческий глаз.* За единицу светового потока принят люмен (*лм*). *1 люмен=1/683 вт при однородном излучении с длиной волны, равной 555 ммк*, к которой наиболее чувствителен глаз. При другой волне 1 *лм*

Таблица 43

Спектр излучений от инфракрасных до рентгеновских лучей

Общее название лучей	Название отдельных участков лучей	Длина волны (*мк*)	Примерное восприятие (видимость) лучей глазом человека (за единицу принята видимость лучей с $\lambda = 0{,}55$ *мк*)
Инфракрасные	Декамикронные	100—10	Не видны, воспринимаются по тепловому действию
	Микронные	10—0,76	
Световые	Красные	0,76—0,62	0,02
	Оранжевые	0,62—0,59	0,45
	Желтые	0,59—0,56	0,90
	Зеленые	0,56—0,50	0,80
	Голубые	0,50—0,48	0,30
	Синие	0,48—0,45	0,12
	Фиолетовые	0,45—0,38	0,025
Ультрафиолетовые	УФЛ области А	0,38—0,32	Не видны
	УФЛ области В	0,32—0,275	
	УФЛ области С	0,275—0,005	
Рентгеновские	Граничные	0,005 и короче	
	Мягкие		
	Жесткие		

не будет равновелик мощности 1/683 *вт*. Существует и другое определение: *люмен — это поток, излучаемый абсолютно черным телом с площадью 0,5305 мм² при температуре затвердевания платины* (2042° К). Упрощенно абсолютно черным считается тело, которое равномерно и в одном направлении излучает, а все приходящие извне лучи — поглощает, то есть оно не обладает отражательной способностью.

Представление о величине люмена могут дать следующие примеры. Световой поток, падающий на 1 *м²* поверхности земли летом при солнечном освещении, равен 10 000 *лм*; световой поток лампы накаливания 100 *вт* напряжением 220 *в* равен 1000 *лм*; световой поток лампы карманного фонаря равен 6 *лм*.

Сила света I — *пространственная плотность светового потока, то есть отношение светового потока к величине телесного (пространственного) угла, в котором он равномерно распределяется:*

$$I = \frac{F}{\omega}, \qquad (226)$$

где F — световой поток, приходящийся на телесный угол ω.

Единица силы света — свеча (*св*). 1 *св*=1 *лм*/1 *стер* (стерадиан). Стерадиан — *это телесный угол, который имеет вершину в центре сферы и опирается на участок сферы с площадью, равной квадрату радиуса сферы.*

Другое определение: *свеча — это* $^1/_{60}$ *силы света, испускаемого 1 см*^{2} *абсолютно черного тела при температуре затвердевания платины.*

Яркость B — *поверхностная плотность силы света в заданном направлении, равная отношению силы света I к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению:*

$$B = \frac{I}{S \cos \alpha}, \qquad (227)$$

где S — площадь светящейся поверхности;

α — угол между светящейся поверхностью и заданным направлением.

Единица яркости — нит (*нт*). 1 *нт*=1 *св*/*м*^{2}. Белая диффузная поверхность, отражающая 100% света, имеет яркость 1 *нт* при освещенности 3 *лк*.

Освещенность E — *поверхностная плотность светового потока, то есть отношение светового потока F к площади S_0, на которую он равномерно падает:*

$$E = \frac{F}{S_0}. \qquad (228)$$

Единица освещенности — люкс (*лк*). 1 *лк*=1 *лм*/*м*^{2}. Светность R — *поверхностная плотность светового потока, испускаемого поверхностью, равная отношению светового потока F к площади светящейся поверхности $S_п$:*

$$R = \frac{F}{S_п}. \qquad (229)$$

Единица светности — радлюкс (*рлк*). 1 *рлк*=1 *лм*/*м*^{2}.

Яркость и светность зависят от коэффициентов отражения освещаемых поверхностей. Освещенность не зависит от коэффициента отражения. Яркость связана с определенным направлением, а освещенность и светность не связаны с направлением. Физическое представление о величинах могут дать следующие примеры: освещенность при хирургической операции должна быть равна 3000 *лк*, при чтении книги — 50 *лк*; освещенность в летний полдень на широте Москвы 80—100 тыс. *лк*; светность чистого снега в солнечный полдень равна 80 000 *лм/м*^{2}, светность вольфрамовой нити лампы накаливания 100 *вт*, 220 *в*, при T=2700° K равна 17.10^6 *лм/м*^{2}.

Яркость солнца, находящегося в зените, равна 150.10^7 *нт*, яркость белой бумаги при освещенности в 50 *лк* равна 0,05 *нт*.

Световая энергия представляет собой произведение светового потока на время его действия и измеряется в люмен-секундах (*лм.сек*).

Световая отдача — это отношение светового потока источника света к мощности, потребляемой источником. Она измеряется в люменах на ватт (*лм/вт*).

Световые свойства материалов. Световой поток, который падает на поверхность, в общем случае частично отражается, частично пропускается и частично поглощается. Если на поверхность падает световой поток F, то в зависимости от свойств материала поверхности этот поток разделяется на три составляющие: отраженный поток, равный $F_\rho = \rho F$, пропущенный поток, равный $F_\tau = \tau F$, поглощенный поток $F_\alpha = \alpha F$. В сумме

$$F = \rho F + \tau F + \alpha F. \qquad (230)$$

Из (230) следует, что сумма коэффициентов отражения ρ, пропускания τ и поглощения α равна единице:

$$\rho + \tau + \alpha = 1. \qquad (231)$$

Проходя через тело или отражаясь от него, свет в той или иной степени рассеивается. При отсутствии рассеивания отражение или пропускание называется направленным (зеркало, оконное стекло). Отражение или пропускание, при котором свет рассеивается настолько, что поверхность приобретает яркость, одинаковую по всем направлениям, называется диффузным. Диффузное отражение имеют мел, гипс и т. д. Матовые поверх-

ности дерева, бумаги, ткани близки к диффузным. Диффузно пропускает свет молочное стекло. Лучшей отражательной способностью обладает барий сернокислый (95% от падающего на него потока), которым покрывают киноэкраны. Белила свинцовые отражают 90% падающего потока, зеркало — 85%, снег — 80—100%, трава — 7%, кожа черная — 1,5%.

§ 2. Лампы накаливания

Лампы накаливания представляют собой источники света, работающие по принципу температурного излучения. Первая лампа накаливания была изобретена в 1873 г. выдающимся русским электротехником А. Н. Лодыгиным. Он же в 1900 г. предложил использовать в качестве нити накала тугоплавкие металлы.

Лампы накаливания пока являются наиболее распространенными источниками света (рис. 268). В качестве

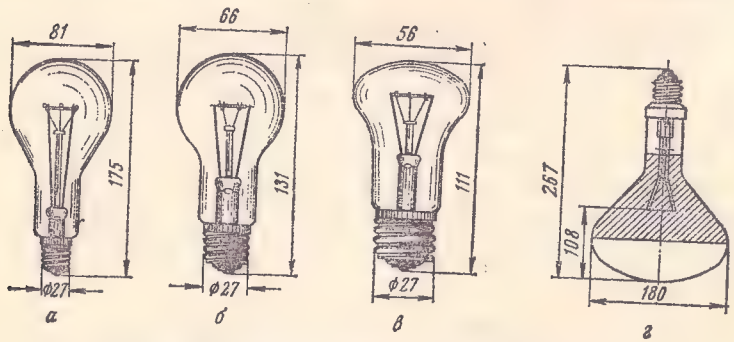


Рис. 268. Некоторые типы ламп накаливания:
а — газополная (НГ 150 *вт*, 220 *в*); *б* — биспиральная; *в* — биспиральная криптоновая (НБК75); *г* — зеркальная (ЗН-5; ЗН-8).

нити накала в современных лампах используют спираль из вольфрама, имеющего температуру плавления около 3600°. Нить накала может быть моноспиральной (односпиральной), биспиральной (дважды спиральной), а в некоторых лампах накаливания трижды спиральной. Некоторые лампы наполняют нейтральным газом (азотом, аргоном или криптоном). Температура накала нити достигает 2600—3000° К. Спектр ламп накаливания отличается

от спектра дневного света преобладанием желтых и красных лучей.

Обычно диапазон излучения источника света весьма широк — от невидимых тепловых лучей через лучи, воспринимаемые глазом, до невидимых ультрафиолетовых лучей. Световым к. п. д. источника света называется отношение мощности, которая превращается в видимый и воспринимаемый глазом свет, к мощности, расходуемой на полный диапазон излучения. Световой к. п. д. ламп накаливания не превышает 3—3,5%.

Промышленность выпускает различные типы ламп, отличающиеся номинальными значениями мощности и напряжения, размерами, формой колб, цоколями и т. д. Наиболее распространены нормальные лампы. Кроме нормальных ламп, выпускаются лампы для специальных целей, то есть для использования на транспорте, в авиации, в фотографии, в различных приборах и т. д. По своему назначению и конструктивным особенностям специальные лампы накаливания подразделяются на группы: зеркальные (тип ЗН), железнодорожные (тип Ж), трамвайные (тип Т), автомобильные, для гусеничных машин (тип ТН), самолетные (тип СМ), миниатюрные (тип МН), для фотографии (тип СП), светофорные (тип ЖС), термоизлучатели (тип ЗС), местного освещения (тип МО) и др.

Нормальные лампы мощностью до 40 *вт* изготавливают вакуумными (тип НВ), большей мощностью изготавливают газополными (аргон в смеси с азотом; тип НГ), газополными биспиральными (тип НБ) и биспиральными с криптоновым заполнением (НБК). Нормальные лампы типа НВ и НГ изготавливают на напряжения 110, 120, 127, 180, 220 и 230 *в* мощностью 10, 15, 25, 40 *вт* (НВ) и 60, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 750, 1000 *вт* (НГ). Биспиральные лампы НБ изготавливают мощностью от 40 до 100 *вт* на те же напряжения. Лампы на 230 *в* рекомендуется включать у потребителей, расположенных вблизи от трансформаторной подстанции или другого источника электроснабжения; лампы на 180 *в* — у потребителей, расположенных в конце линии. Биспиральные криптоновые лампы (НБК) изготавливают мощностью 25 *вт* (127 *в*) и 40, 60, 75, 100 *вт* (127 и 220 *в*).

Лампы накаливания зеркальные ЗН-5 (127 *в*, 300 *вт*), ЗН-6 (127 *в*, 500 *вт*), ЗН-7 (220 *в*, 300 *вт*), ЗН-8 (220 *в*, 500 *вт*) имеют баллоны параболической формы, у которых

внутренняя поверхность частично покрыта зеркальным слоем, а внешняя матирована. Они применяются для освещения высоких помещений, открытых пространств, для декоративного освещения и других целей. При освещении закрытых помещений их можно применять без осветительной арматуры, а при освещении снаружи их необходимо защищать от атмосферных осадков. Зеркальный слой способствует тому, что не менее 40% всего светового потока лампы выходит концентрированно в пространственном углу 40° от оси лампы. Такие лампы представляют собой сочетание источника и арматуры-отражателя.

Выпускаются также лампы-светильники с диффузным отражателем типа НГД мощностью 40 и 60 *вт* на 127 *в* и мощностью 40, 60, 150, 200 и 300 *вт* на 220 *в*. Световой поток, излучаемый в выходное отверстие, составляет не менее 80% ее общего потока. Лампы 150, 200 и 300 *вт* целесообразно применять для освещения школ, библиотек, зрелищных предприятий и т. п. С диффузным отражателем выпускаются лампы и для местного освещения (МОД) на 12 и 36 *в*.

Основные параметры ламп накаливания: номинальное напряжение, номинальная мощность, которую лампа потребляет из сети, световой поток, световая отдача и средний срок службы.

Номинальное напряжение — это напряжение, на которое рассчитана лампа и при котором она потребляет из сети расчетную номинальную мощность. Срок службы, или нормированная продолжительность горения лампы накаливания,— это расчетное время горения лампы накаливания до перегорания при заданном напряжении. Так как температура нити зависит от фактически подводимого напряжения, то с изменением напряжения резко меняются все характеристики лампы. Срок службы лампы накаливания резко сокращается при использовании ее на напряжении выше номинального, указанного для лампы. Снижение же напряжения в целях увеличения срока службы приводит к резкому снижению светового потока. Нормированная продолжительность горения нормальной лампы накаливания составляет 1000 *ч*.

Номинальная световая отдача — величина, которая характеризует экономичность лампы; она существенно зависит от величины подводимого к лампе напряжения.

Характеристики ламп: потребляемая мощность, световой поток, срок службы и др. зависят от величины подводимого напряжения (табл. 44).

Таблица 44

Зависимость основных характеристик нормальных ламп накаливания от подводимого напряжения

Напряжение	Ток	Мощность	Сопротивление	Световой поток	Световая отдача	Срок службы
В процентах от номинальных значений						
85	92	78	93	55	72	1000
90	95	85	95	70	82	500
94	97	91	97	81	89	260
98	99	97	99	93	96	130
100	100	100	100	100	100	100
102	101	103	101	107	104	75
106	103	110	102	122	111	40
110	106	107	103	137	117	—

Световая отдача ламп одинаковой мощности, но выполненных на разные номинальные напряжения, отличается в сторону увеличения для ламп с меньшим номинальным напряжением. Лампы на 127 *в* имеют световую отдачу примерно на 15% выше, чем лампы на 220 *в* такой же мощности. Это обусловливается тем, что у ламп накаливания одинаковой мощности нить накала имеет тем бóльшую поверхность излучения, чем меньше напряжение (нить накала толще при меньшем напряжении).

Для иллюстрации этого положения в таблице 45 приведены данные различных ламп одинаковой мощности, но разного напряжения.

В городах для освещения чаще используют напряжение 110 или 127 *в*, так как осветительная нагрузка на электрическую сеть в городе имеет высокую удельную плотность. В пригородах и в сельской местности, где удельная нагрузка значительно меньше, для освещения используется напряжение 220 *в*.

Примерный энергетический баланс ламп накаливания представлен в таблице 46. Лампы накаливания с криптоновым заполнением имеют наибольший к. п. д., так как криптон лучше защищает нить накала от распыла и тем самым позволяет увеличить температуру ее накала.

Таблица 45

Сравнение ламп на 220 и 127 в

Напряжения (в) и типы ламп	Мощности ламп (вт)			
	40	60	75	100
	световой поток (лм)			
220 НБ	370	620	840	1240
220 НБК	—	700	950	1380
127 НБ	440	740	980	1400
127 НБК	—	820	1080	1560

Таблица 46

Примерный энергетический баланс ламп накаливания

Лампы накаливания	Распределение энергии (%)			
	видимые излучения	невидимые излучения	потери теплопередачей и конвекцией	всего
Пустотные лампы накаливания	7	86	7	100
Газополные лампы накаливания с аргоном . .	10	68	22	100
Биспиральные лампы накаливания с аргоном	12	74	14	100
Лампы накаливания с криптоно-ксеноновым заполнением	13	76	11	100

Примечание. Глазом воспринимается часть видимых излучений в соответствии с данными таблицы 43.

Указания по эксплуатации ламп накаливания. 1. Напряжение сети должно соответствовать напряжению, указанному на цоколе или колбе лампы. При снижении напряжения уменьшается световой поток, а при увеличении напряжения резко сокращается срок службы лампы.

2. Лампами накаливания (кроме зеркальной) в качестве источника света следует пользоваться совместно с осветительной арматурой, которая перераспределяет све-

товой поток в соответствии с потребностью рационального освещения, а также защищает от слепящего действия тела накала. Арматура светильников с мощными лампами должна иметь вентиляционные приспособления во избежание чрезмерного нагрева цоколя лампы и для его охлаждения.

3. Чтобы не уменьшался световой эффект, осветительную арматуру и лампы необходимо периодически очищать от пыли и грязи.

4. В ряде осветительных арматур необходимо правильно устанавливать лампы, чтобы получить нужный световой эффект (зеркальная арматура, прожекторы, автомобильные фары и др.).

5. Следует следить за состоянием контактов между цоколем лампы и патроном. При плохом состоянии контакта вследствие искрения и падения напряжения в месте плохого контакта снижается световой поток лампы и светоотдача, а иногда и совсем прекращается горение.

6. Следует предохранять лампы при горении от попадания влаги на баллон, так как на стекле могут образоваться трещины и лампа выйдет из строя.

7. Лампы следует хранить в закрытом помещении с относительной влажностью не выше 70% и температурой не ниже 5°. При транспортировании следует соблюдать меры предосторожности, не допуская сильных сотрясений и ударов, а также воздействия атмосферных осадков.

Электрический контакт и механическая связь лампы с патроном осуществляются с помощью цоколя. Обычно для ламп употребляются резьбовые цоколи (обозначаются буквой Р) и штырьковые, или штифтовые (обозначаются буквой Ш). Последние исключают самоотвинчивание при вибрациях. Они употребляются главным образом с лампами железнодорожными, автомобильными, трамвайными и др. Цоколи штырьковые могут быть одноконтактными и двухконтактными. В зависимости от размеров ламп и те и другие могут иметь различные размеры.

В обозначении цоколя буквы означают: Р — резьбовой, Ш — штырьковый, Сф — софитный, Ц — цилиндрический. Далее следует цифра, указывающая диаметр цоколя в *мм*.

Металлические части цоколей выполняют из латуни или стали с антикоррозийным цинковым покрытием.

Патроны для электрических ламп накаливания также подразделяются на две основные группы: резьбовые и штифтовые.

Патроны резьбовые выполняются с резьбовыми гильзами Ц-14, Ц-27, Ц-40, где цифра означает диаметр в *мм*. Их изготавливают из цветных металлов, стали, фарфора и пластических масс. По форме исполнения патроны подразделяются на патроны для навинчивания на ниппель, патроны с фланцем и патроны для подвеса.

§ 3. Арматура для ламп накаливания. Прожекторы

Источник света вместе с арматурой образует светильник. Арматура перераспределяет световой поток в нужном направлении, защищает глаза от ослепления и источник света от пыли, влаги и др. По распределению светового потока между верхней и нижней полусферами различают светильники: а) прямого света, когда в нижнюю полусферу излучается не менее 90% всего потока; б) преимущественно прямого света (от 60 до 90%); в) рассеянного света, когда в каждой из полусфер излучается не более 60% светового потока; г) преимущественно отраженного света, когда в верхнюю полусферу излучается от 60 до 90% всего светового потока; д) отраженного света (более 90%). По исполнению различают светильники: открытые, когда лампа не отделена от внешней среды; закрытые — лампа и патрон отделены от внешней среды оболочкой без уплотнений; влагозащищенные — корпус и патрон противостоят воздействию влаги, а конструкция обеспечивает надежную изоляцию вводных концов друг от друга и от металлических частей светильника; пыленепроницаемые; взрывозащищенные.

В зависимости от характера помещения и назначения светильника в сельском хозяйстве наиболее широкое распространение получили следующие арматуры.

1. «Универсаль» (рис. 269, *а*) — открытый светильник для общего освещения производственных помещений высотой 4—6 *м*. Рассчитан на работу с лампами 150 *вт* (тип светильника У-150), 200 *вт* (У-200), 500 *вт* (У-500). Отражатель изнутри покрыт белой эмалью. С помощью трех винтов могут быть установлены рассеиватели из матиро-

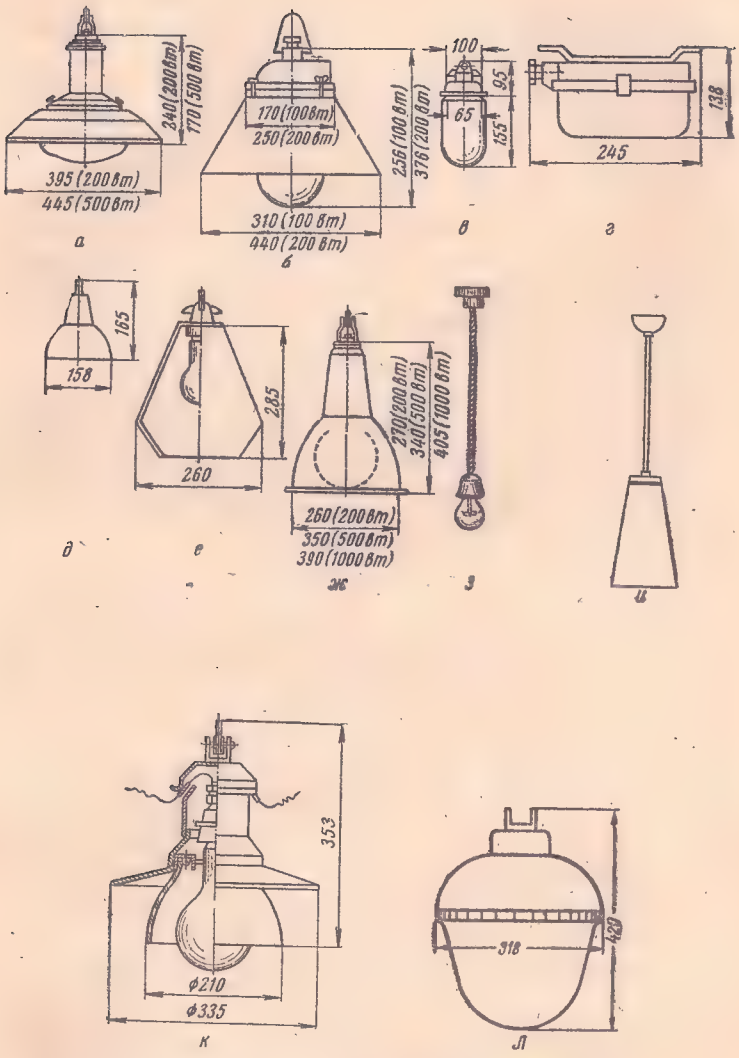


Рис. 269. Арматура для ламп накаливания:

а — «Универсаль»; *б* — промышленный уплотненный светильник типа ПУ; *в* — фарфоровый полугерметический светильник Фм; *г* — сельскохозяйственный светильник ПСХ; *д* — светильник «Альфа»; *е* — светильник «Люцетта»; *ж* — глубокоизлучатель; *з* — простой шнуровой подвес; *и* — шнуровой подвес типа ПШ; *к* — светильник наружного освещения; *л* — светильник СПП-500 (подвесной призматический).

ванного стекла. При наличии рассеивателей светильники «Универсаль» могут быть использованы в помещениях малой высоты. «Универсаль» уплотненный (Уп) предназначается для помещений влажных, сырых и особо сырых, а также пыльных. Для сельского хозяйства выпускается также светильник У-100.

2. Промышленные уплотненные светильники типа ПУ-100 (с лампой до 100 *вт*) и ПУ-200 (до 200 *вт*) предназначаются для использования в производственных помещениях с большим количеством невзрыво- и непожароопасной пыли и промышленных газов. Уплотнение светильника достигается с помощью резиновой прокладки между стеклянным рассеивателем и корпусом. Эти светильники могут применяться с отражателями (рис. 269, *б*).

3. Фарфоровый полугерметический светильник Фм с лампами до 60 *вт* предназначен для общего и локализованного освещения сырых, особо сырых, с химически активной средой производственных помещений небольшой высоты. Состоит из фарфорового корпуса, в нарезную часть которого ввинчивается рассеиватель из матированного стекла (рис. 269, *в*). Аналогичные этим светильники типа ПГ-60 выполняются с пластмассовым корпусом, герметизированными, с лампой до 60 *вт*.

4. Для сельскохозяйственных помещений изготавливаются светильники ПСХ с лампами 75—150 *вт* (рис. 269, *г*), предназначенные для общего и локализованного освещения производственных сельскохозяйственных помещений (сараев, хлевов, амбаров и т. д.), а также для установки на наружных стенах построек и зданий. Выпускается также светильник СХНШ-100 широкого светораспределения.

5. Светильник «Альфа» (рис. 269, *д*) для ламп до 60 *вт* применяется для местного освещения. Прибор укрепляется непосредственно над рабочим местом.

6. Светильник «Люцетта» с лампами до 200 *вт*, из цельного молочного стекла, применяется в бытовых и служебных непыльных помещениях (рис. 269, *е*). В исполнениях с фарфоровым патроном пригоден для помещений особо сырых и с химически активной средой.

7. Шар молочного стекла Шм с лампами до 60 *вт* при диаметре 150 *мм*, до 150 *вт* при 250 *мм* и до 300 *вт* при 350 *мм* применяется для общего освещения культурных и бытовых помещений, а также помещений с повышенными

требованиями к качеству освещения, в лабораториях, конструкторских бюро и т. д. (наряду с «Люцеттой»).

Для производственных помещений с нормальными условиями среды выпускаются также светильники следующих типов: Г — «Глубокоизлучатель» с лампами от 150 до 1500 *вт*; К — «Кососвет» с лампами от 25 до 500 *вт*, с углом наклона оси симметрии отражателя к вертикали 35—40°; П — плафоны потолочные, 60 *вт*, и др.

Для производственных помещений с тяжелыми условиями среды выпускаются светильники: ПУН — плафоны потолочные пылеводонепроницаемые, с лампами 60 и 100 *вт*; СХ и СХМ — для сырых и с химически активной средой помещений, с лампами от 60 до 500 *вт* и т. д.

Для взрывоопасных помещений выпускаются светильники типов НОБ, ВЗГ, В4А.

Для помещений общественных зданий применяются светильники СК-300— кольцевой, с пятью металлическими кольцами, 300 *вт*; КМО — с тремя металлическими экранирующими кольцами и конусом, 300 *вт* и др. Для освещения улиц выпускаются светильники СПО-300, СПП-200, СЗП-500, СЗЛ-300 и др.

Для освещения складов, заводских территорий, фасадов зданий и для других целей используются прожекторы. Прожекторы заливающего света ПЗС выполняются с металлическими (хромированными) или стеклянными отражателями параболической формы. В качестве источников света используются специальные прожекторные лампы. В прожекторах типа ПЗС-24 с диаметром стекла 24 *см* применяются лампы 150—200 *вт*, в прожекторах ПЗС-35 с диаметром стекла 35 *см* — лампы 300—500 *вт*, а в прожекторах ПЗС-45— лампы 1000 *вт*. Новые прожекторы ПСМ-40 и ПСМ-50 с лампами 500 и 1000 *вт* также предназначаются для освещения открытых пространств, архитектурного и иллюминационного освещения.

В специальных случаях применяют разные типы фасадных прожекторов серии ПФС.

Как правило, прожекторы размещаются на мачтах или высоких зданиях сосредоточенными группами. Наименьшая высота мачт (за исключением случаев освещения стадионов) определяется из условия

$$\frac{\text{Осевая сила света прожектора}}{\text{Квадрат высоты установки}} \leqslant 300.$$

В соответствии с приведенным равенством наименьшие высоты

для ПЗС-35, 500 *вт*, 220 *в* — 17 *м*
для ПЗС-35, 500 *вт*, 127 *в* — 20 *м*
для ПЗС-45, 1000 *вт*, 220 *в* — 22 *м*
для ПЗС-45, 1000 *вт*, 127 *в* — 30 *м*

Высота установки прожекторов для освещения стадионов определяется из такого расчета, чтобы перпендикуляр, опущенный из площадки мачты на продольную ось поля, образовывал с горизонтальной плоскостью угол не менее 27°.

§ 4. Люминесцентные лампы

Электрическая энергия может превращаться в световую непосредственно, независимо от теплового состояния вещества, излучающего свет, за счет люминесценции. Существует большое число газосветных ламп, работающих на принципе электролюминесценции — свечения газа в трубке лампы под действием электрического тока. К таким лампам, в частности, относятся газосветные рекламные трубки (лампы тлеющего разряда).

Принцип действия этих ламп в упрощенном представлении сводится к следующему. Если к электродам, вставленным в концы стеклянной трубки, которая заполнена инертным газом или парами металла, приложить напряжение из расчета не менее 500—2000 *в* на 1 *м* длины трубки, то свободные электроны начинают лететь в сторону электрода с положительным знаком. Если к электродам приложено переменное напряжение, то они меняют направление движения с частотой тока. В своем движении электроны встречаются с нейтральными атомами газа — заполнителя трубки и ионизируют их, выбивая электрон с верхней орбиты атома в пространство или с нижней орбиты на верхнюю. Возбужденные таким образом атомы, вновь сталкиваясь с электронами, снова превращаются в нейтральные атомы. Это обратное превращение сопровождается излучением. Каждому инертному газу и парам металла соответствует своя длина волны излучения. Так, трубки с гелием светятся светло-желтым или бледно-розовым светом, с неоном — красным светом, с аргоном — голубым и т. д. Смешивая инертные газы или нанося лю-

минофоры на поверхность разрядной трубки, получают разные оттенки свечения.

Трубки (лампы), заполненные парами натрия, дают желтый свет. Трубки, заполненные парами ртути, дают фиолетовое и ультрафиолетовое излучение. Это излучение, возникающее в парах ртути, используется в люминесцентных лампах дневного и белого света, а также в источниках ультрафиолетовых лучей (лампы ПРК, БУВ, ЭУВ и др.).

Люминесцентные лампы дневного и белого света выполняют в виде прямой или дугообразной трубок из обычного стекла, не пропускающего коротковолновые ультрафиолетовые лучи. Электроды изготавливают из вольфрамовой проволоки. Трубку заполняют смесью аргона и паров ртути. Внутри трубка покрыта люминофором — специальным составом, который светится под воздействием ультрафиолетовых лучей, возникающих при электрическом разряде в парах ртути. Аргон способствует надежному возникновению разряда в трубке.

Для надежного зажигания разряда электроды предварительно разогревают. Затем к ним подают напряжение, в результате чего возникает разряд. По существу в трубке лампы происходит электролюминесценция аргона и паров ртути и фосфоресценция люминофора.

В состав люминофоров входят: вольфрамат кальция, силикат цинка, кадмий-бромат и другие вещества. В зависимости от процентного содержания того или иного вещества получается различная цветность излучения. Лампы дневного света типа ЛД имеют цветность излучения подобно безоблачному небу; лампы белого света ЛБ — подобно прямому солнечному свету. Люминесцентные лампы экономичнее ламп накаливания. В обозначении типа ламп буквы означают: ЛД — люминесцентная дневного света (цветовая температура 6500°К); ЛБ — белого света (цветовая температура 3500°К); ЛТБС—тепло-белого света (цветовая температура 2700° К); ЛХБ-холодно-белого света (4850°К).

Цифры после букв означают мощность лампы. Кроме того, в обозначении типов дугообразных ламп указывается радиус дуги. Например, ЛТБ-30-825 означает: лампа тепло-белого света, 30 *вт*, радиус изгиба трубки 825 *мм*.

В таблице 47 приведены световые потоки люминесцентных ламп ЛД и ЛБ. Из сравнения данных таблиц 45 и

47 следует, что лампа накаливания 60 *вт*, 127 *в* имеет световой поток 660 *лм*, а лампа ЛБ-20, 20 *вт*, 127 *в* имеет световой поток 800 *лм*. Световой поток лампы накаливания 150 *вт*, 220 *в* — 1845 *лм*, а световой поток лампы ЛБ-40, 220 *в* — 2120 *лм*. Таким образом, на образование светового потока такого же, как и от лампы накаливания, люминесцентная лампа требует примерно в 3 раза меньше мощности. В этом основное преимущество люминесцентных ламп. Другие их преимущества — более благоприятный спектр излучения, невысокая температура поверхности трубки, большой срок службы (более 3000 *ч* вместо 1000 *ч* у ламп накаливания). Недостатки этих ламп — необходимость в приборах для зажигания и ограничения тока, большие габаритные размеры, чувствительность к температуре окружающей среды. Однако, как это будет видно из экономического сравнения ламп накаливания и люминесцентных ламп, эти недостатки перекрываются преимуществами.

Для работы в условиях повышенной запыленности выпускают рефлекторные лампы типа ЛБР-40. Рефлекторный слой или диффузное отражающее покрытие, состоящее из порошка с высоким коэффициентом отражения, наносится на две трети окружности внутренней поверхности трубки. Затем вся внутренняя поверхность трубки покрывается слоем люминофора. Благодаря рефлекторному слою через «выходное окно» (не покрытую рефлекторным слоем часть трубки) проходит световой поток на 70—80% больше, чем через такую же часть трубки в обычной лампе.

Существует большое число схем включения люминесцентных ламп. На рисунке 270 приведены две схемы: вклю-

Таблица 47

Световые потоки некоторых люминесцентных ламп

Тип лампы	Номинальная мощность (*вт*)	Номинальный световой поток (*лм*)	Тип лампы	Номинальная мощность (*вт*)	Номинальный световой поток (*лм*)
ЛБ-15	15	585	ЛД-40	40	1640
ЛТБ-15	15	525	ЛБ-40	40	2120
ЛД-30	30	1200	ЛД-80	80	2960
ЛБ-30	30	1560	ЛБ-80	80	3680

чение одной лампы со стартерным зажиганием и схема быстрого зажигания лампы 80 *вт*.

Конденсатор C_1 служит для снижения радиопомех, возникающих при зажигании лампы в стартере (искрение). Конденсатор C_2 включается для повышения коэффициента мощности схемы. Емкость C_2 равна 4—6 *мкф*.

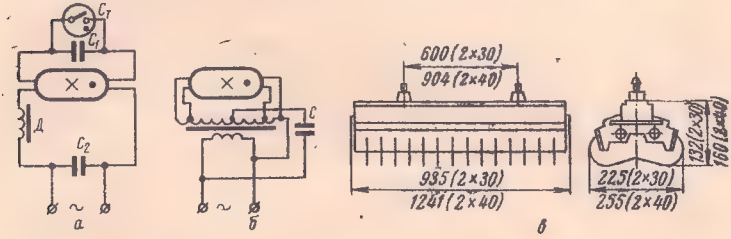


Рис. 270. Схемы включения люминесцентных ламп:
а — со стартером; *б* — схема быстрого зажигания; *в* — светильник АОД с решетчатым затенителем; *Ст* — стартер или зажигатель; *Д* — дроссель; *С*, C_1 и C_2 — конденсаторы.

Для включения ламп мощностью 80 *вт* используются трансформаторы типа БЛ-80. Стартер отсутствует. Электроды разогреваются током от накальных обмоток трансформатора (на каждый электрод включено по нескольку витков). Зажигается лампа благодаря повышенному напряжению, возникающему на обмотке трансформатора в момент, когда нагрузка на нем отсутствует (лампа не зажжена). При зажигании лампы нагрузка на трансформатор увеличивается и напряжение между электродами лампы снижается до расчетного значения.

Стартеры, или зажигатели, представляют собой неоновые лампы тлеющего разряда, у которых один из электродов биметаллический и автоматически замыкает и размыкает цепь электродов лампы. При включении схемы в сеть между электродами стартера происходит тлеющий разряд, который нагревает электроды. Биметаллический электрод изгибается и замыкает цепь. Электроды люминесцентной лампы при этом нагреваются до 800°, и вокруг них образуются облака электронов в результате термоэлектронной эмиссии. В стартере, после того как электроды его замкнулись и тлеющий разряд прекратился, электроды остывают и размыкаются. Напряжение сети

плюс импульс э. д. с., наведенной дросселем в момент размыкания цепи стартера, вызывают электрический разряд в трубке, сперва в аргоне, а затем по мере испарения ртути в ее парах. Процесс зажигания лампы после ее включения длится 1—2 *сек*. Конденсатор C_1 находится в одном кожухе с неоновой лампочкой стартера. Его цилиндрический кожух выполняется из жести или пластмассы. Зажигатели выпускаются двух типов: СК-127 и СК-220 для установок с напряжением соответственно 127 и 220 *в*.

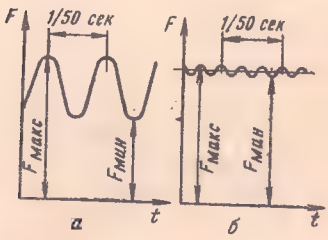


Рис. 271. Световой поток одной лампы (*а*), трех ламп, включенных в три фазы (*б*):
$F_{макс}$ — максимальное мгновенное значение светового потока; $F_{мин}$ — минимальное мгновенное значение потока.

Дроссель служит для ограничения тока через лампу. Если бы он отсутствовал, то ток через лампу мгновенно увеличился бы до большой величины и электроды лампы перегорели. Дроссели изготавливают в открытом и закрытом исполнении. При закрытом исполнении их помещают в металлический кожух и заливают изоляционной массой. Для каждого типа и мощности ламп предназначается свой дроссель.

Для монтажа прямых ламп и зажигателей в осветительной арматуре выпускаются специальные патроны: для ламп тип ПЛ-1 и для стартеров тип ПЛ-2. Для дугообразных ламп применяются особые патроны.

Поскольку люминесцентные лампы имеют большую глубину пульсации светового потока (рис. 271, *а*), при освещении движущихся предметов возникает стробоскопический эффект — зрительное впечатление множественности движущегося предмета. Это обстоятельство во многих случаях нежелательно, так как ведет к искажению впечатления от освещенного объекта, а также приводит к быстрой усталости зрения. Чтобы избежать появления стробоскопического эффекта, включают люминесцентные

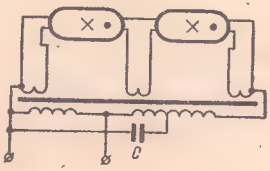


Рис. 272. Схема включения двух ламп ЛБ-80 с трансформатором БЛ-2/80.

лампы на различные фазы сети. На рисунке 271, *б* показан световой поток от трех ламп, включенных на различные фазы. С этой же целью (исключить стробоскопический эффект и в то же время повысить коэффициент мощности) применяют различные схемы включения двух или трех ламп в однофазную сеть. На рисунке 272 представлена схема включения ламп 80 *вт* с трансформатором на две лампы типа БЛ-2/80.

Благодаря конденсатору *С* достигается снижение пульсаций суммарного светового потока и одновременно повышается коэффициент мощности (до 0,9).

Люминесцентные лампы чувствительны к температуре окружающего воздуха. Световой поток при 0° составляет 50% светового потока при 25°. Это связано с тем, что ртутные пары частично конденсируются с понижением температуры. При низкой температуре по этой же причине не может возникнуть разряд в лампе.

Промышленность выпускает большое число различных типов светильников с люминесцентными лампами. Для производственных помещений с нормальными условиями среды — светильники типов: ОД—диффузный со сплошным отражателем; ОДР — то же, с решетчатым затенителем; ОДОР — то же, с отражателем с отверстиями (перфорированный); МОД — модификация светильника ОД; ВЛО — встраиваемые в перекрытия зданий и др. Для помещений с тяжелыми условиями среды: ВОД — встраиваемые в перекрытия зданий; ПЛУ — потолочные закрытые (плафоны); ПВЛ — подвесные закрытые и др. Для общественных зданий: АОД — модификация светильника ОД; БП и ПУ — потолочные плафоны; ШОД — подвесные для школ, лабораторий и т. п.; ШЛП — потолочные для школ и т. п.; ШКД — настенные зеркальные для освещения вертикальных поверхностей, например классных досок, и др. Для освещения жилых и общественных помещений: ПДЛ — подвесные потолочные; ПБЛ, БЛ — настенные светильники для общего и местного освещения; ТЛ — напольный.

Светильники изготавливают с 1, 2, 3, 4, а некоторые и с 6 лампами. В обозначениях светильника обычно указывается число ламп и их мощность. Например, ОД-2×40 означает: 2 лампы по 40 *вт* каждая. Для некоторых сельскохозяйственных помещений изготавливается светильник СХЛ-1×40.

§ 5. Сравнение расходов на эксплуатацию ламп накаливания и люминесцентных ламп

Годовые эксплуатационные расходы K (руб.) могут быть подсчитаны по формуле

$$K = A\frac{a}{100} + \frac{B}{L}Tn + CPT,$$

где A — стоимость оборудования и монтажа осветительной установки без учета стоимости ламп (руб.);
a — норма амортизационных отчислений (%);
B — цена лампы (руб.);
L — срок службы ламп (*ч*);
n — число ламп;
C — стоимость 1 *квт·ч* электроэнергии (руб.);
P — присоединенная мощность осветительной установки (*квт*);
T — число часов использования установки в году.

Сравним годовые эксплуатационные расходы при люминесцентном освещении в производственном помещении с расходами на освещение лампами накаливания. Две лампы накаливания по 150 *вт* (220 *в*) дают общий световой поток $2\times1845=3690$ *лм*. Две лампы БС-40 (220 *в*) дают световой поток $2\times2120=4240$ *лм*. Стоимость двух светильников «Универсаль» $A_1=2\cdot6{,}0=12$ руб. Стоимость двух светильников для БС-40 типа ОД-2-40 с пускорегулирующим устройством $A_2=2\cdot29{,}0=58$ руб. Норма амортизационных отчислений $a_1=a_2=15\%$. Цена двух ламп накаливания 150 *вт* $B_1=2\cdot0{,}3=0{,}6$ руб. Цена двух ламп ЛБ-40 $B_2=2\cdot1{,}2=2{,}4$ руб. Срок службы лампы накаливания равен 1000 *ч*. Срок службы лампы ЛБ-40 равен 3000 *ч*. Присоединенная мощность $P_1=0{,}3$ *квт*, $P_2=0{,}08$ *квт* (0,1 *квт*).

Годовое число часов использования светильников $T=1200$ *ч*. Если стоимость электроэнергии равна 0,04 руб. за 1 *квт·ч*, годовые эксплуатационные расходы на освещение лампами накаливания

$$K_1 = 12{,}0\frac{15}{100} + \frac{0{,}6}{1000}1200 + 0{,}04\cdot0{,}3\cdot1200 = 1{,}8 + 0{,}72 + 14{,}4 = 16{,}92 \text{ руб.}$$

На освещение люминесцентными лампами ЛБ

$$K_2 = 58\,\frac{15}{100} + \frac{2{,}4}{3000}\,1200 + 0{,}04 \cdot 0{,}08 \cdot 1200 = 8{,}7 + 0{,}96 + 3{,}84 = 12{,}5 \text{ руб.}$$

На рисунке 273 рост годовых эксплуатационных расходов представлен графически в зависимости от числа

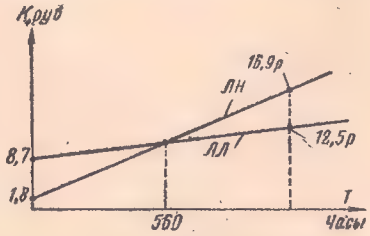


Рис. 273. Зависимость эксплуатационных расходов от числа часов использования светильников в год:
ЛЛ — люминесцентные лампы;
ЛН — лампы накаливания.

часов использования светильников в год. Можно видеть, что эксплуатационные расходы сравняются в том случае, если светильник будет использоваться примерно 560 *ч* в год. Если светильники будут использоваться меньше 560 *ч* в год, то целесообразнее использовать лампы накаливания. Если число часов использования светильника в год больше 560, целесообразнее использовать люминесцентные лампы.

§ 6. Дуговые ртутные люминесцентные лампы высокого давления (ДРЛ)

Эти лампы называются также дуговыми ртутными лампами с исправленной цветностью. Они устроены следующим образом.

Внутри внешнего стеклянного баллона заключена ртутная кварцевая лампа в виде трубки с рабочим давлением паров ртути 2—4 *ати*. При таком давлении возникает мощный поток ультрафиолетовых лучей всех длин волн. Внешняя стеклянная колба (рис. 274, *а*) изнутри покрыта люминофором, который дополняет спектр лампы красными лучами. Люминофор светится под действием ультрафиолетовых лучей, значительную коротковолновую часть которых стекло внешней колбы не пропускает. Лампа снабжена цоколем Р-40. Схема включения лампы представлена на рисунке 274, *б*.

В схеме используется пускорегулирующий аппарат *ПРА* и поджигающее устройство *ПУРЛ*. Схема действует следующим образом. При включении через сопротивление *R* и выпрямитель *B* происходит заряд конденсатора *C*. При определенном значении напряжения на обкладках конденсатора разрядник *P* (неоновая лампа) зажигается. Конденсатор моментально разряжается на часть витков автотрансформатора *ПРА*. В результате этого в *ПРА* возникает (трансформируется) импульс высокого напряжения, который вызывает разряд в ртутной лампе высокого давления. Сетевое напряжение 220 *в* недостаточно, чтобы вызвать зажигание лампы. Процесс полного разгорания лампы длится 5—7 *мин*.

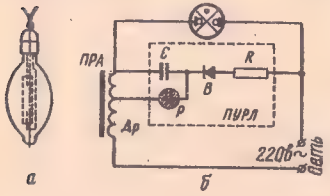


Рис. 274. Лампа ДРЛ (*а*) и схема ее включения (*б*).

В отличие от люминесцентных ламп лампы ДРЛ сосредоточивают в небольшом объеме значительную электрическую и световую мощность. Работают независимо от температуры среды. Несмотря на большой вес пускорегулирующего устройства, удельный расход металла, отнесенный к 1 *лм*, в этих лампах меньше, чем в трубчатых люминесцентных. Лампы ДРЛ в настоящее время широко применяются для уличного и производственного освещения. Эти лампы выпускаются в ряде стран с большим диапазоном мощностей. В Советском Союзе их выпускают на мощности 250, 500, 750 и 1000 *вт* (двухэлектродные, по рис. 274) и 80; 125; 250; 400; 700; 1000 *вт* (четырехэлектродные). Световая отдача этих ламп достигает 40—46 *лм/вт*, то есть примерно равна светоотдаче люминесцентных ламп. Их спектр, хотя и исправленный люминофором, все же не обеспечивает правильной цветопередачи, то есть при освещении этими лампами нельзя судить точно о расцветке освещаемого объекта.

Эти лампы особенно целесообразно применять для наружного освещения, где они используются около 2400 *ч* в год. Их можно также применять в высоких цехах с высотой подвеса не менее 6 *м*, где требуется повышенная освещенность и не обязательна правильная цветопередача. Для помещений с нормальными условиями среды выпу-

скаются светильники с лампами ДРЛ следующих типов: ГСР — с лампой от 250 до 1000 *вт*; ГКР — с лампами 250—500 *вт*; СД-ДРЛ — с лампами 250—750 *вт*; СЗ-ДРЛ — с лампами 400—1000 *вт* и др. Для помещений с тяжелыми условиями труда — светильники типов ГСХР-400 (400 *вт*) и др. Для уличного освещения изготавливаются светильники СЗПР-250 и СКЗПР-500, где цифра указывает мощность используемой в светильнике лампы ДРЛ.

В последнее время появились ксеноновые газоразрядные (дуговые) лампы мощностью от 2 *квт* до нескольких сотен *квт*. Эти лампы требуют специального пускового приспособления, но не требуют балластного сопротивления в работе. Это объясняется особым свойством электрической дуги в ксеноне: ее сопротивление не уменьшается беспредельно, а стабилизируется, в результате чего ток лампы ограничивается собственным сопротивлением дугового разряда. Их типы: ДКСТ-5000, ДКСТ-10 000 и т. д. Специальные светильники для этих ламп не разработаны.

§ 7. Выбор светильников и их размещение

Выбор светильников определяется условиями среды (помещения), экономичностью, безопасностью обслуживания и долговечностью.

В помещениях не запыленных, сухих и не опасных в отношении взрыва специальных требований к конструкциям светильников не предъявляется. В помещениях сырых и особо сырых нужно применять полугерметические светильники с раздельным вводом проводов. В пыльных помещениях следует применять закрытые уплотненные светильники. Во всех случаях следует стремиться избегать применения матированных стекол, трудно очищаемых от пыли.

Для производственных помещений наиболее целесообразными являются светильники прямого света. Светильники отраженного, полуотраженного и рассеянного света в этом случае являются неэкономичными, так как темные стены и потолок будут поглощать падающий на них световой поток.

В невысоких производственных помещениях со светлыми стенами и потолком целесообразно применять полуотраженный и отраженный свет с тем, чтобы использовать

его преимущества, особенно если работа требует зрительного напряжения (чертежные столы, сборка мелких деталей, лаборатории для зерна, школы, больницы и т. д.).

Для бытовых, конторских и аналогичных помещений рекомендуются светильники рассеянного или преимущественно прямого светораспределения. Светильники с люминесцентными лампами следует применять прежде всего в тех помещениях, где работа требует точного различения цветов. Их следует применять также во всех других случаях, когда число часов использования в году достаточно велико, и в их пользу оказывается экономическое сравнение с лампами накаливания.

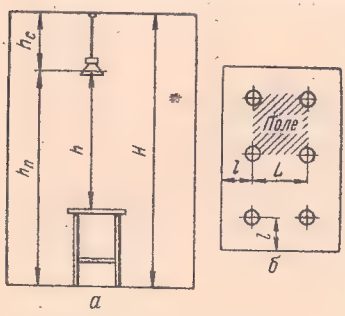


Рис. 275. Расположение светильников в помещении:
а — разрез; *б* — план помещения; $h_п$ — высота подвеса; h_c — свес; h — расчетная высота; H — высота помещения.

На рисунке 275 указаны основные размеры, определяющие расположение светильников в помещении. Высота подвеса $h_п$ зависит от условий помещения, высоты помещения H, конструкции светильника, мощности ламп и от защитного угла светильника.

Защитный угол γ светильника (рис. 276) — важный показатель, определяющий защиту глаза от прямых лучей источника света. Он образуется горизонталью, проходящей через тело накала лампы, и линией, соединяющей крайнюю точку тела накала с противоположным краем отражателя. Величина этого угла может быть определена отношением

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{h}{R+r}, \qquad (232)$$

где h — расстояние от тела накала лампы до уровня выходного отверстия светильника;
R — радиус выходного отверстия светильника;
r — радиус кольца тела накала лампы.

Светильники с защитным углом менее 30° недостаточно защищают глаз от прямых лучей света.

По условиям ограничения слепящего действия высота подвеса светильников над уровнем пола или земли ($h_п$) должна быть не менее значений, приведенных в таблицах 48—50. Свес $h_с$ чаще выбирается равным 0,5—0,7 *м*. Не рекомендуется брать $h_с$ больше 1,5 *м* (кроме многоламповых люстр). Не следует принимать высоту подвеса $h_п$ больше 4—5 *м* (кроме светильников над кранами). В установках наружного освещения светильники чаще всего подвешивают на высоте 6—7 *м* над уровнем земли.

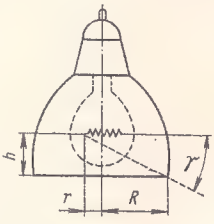


Рис. 276. Защитный угол светильника.

Форму поля можно принимать в виде квадрата, прямоугольника или ромба с острым углом 60° с отношением сторон не более 1,5. В таблице 50 указаны наиболее целесообразные отношения расстояния L между светильниками к высоте их подвеса h для различных светильников, если поле квадратное. При другой форме поля величину L можно найти, если принять площадь прямоугольного поля равной площади квадратного поля, а площадь ромбического поля равной 1,3 площади квадратного поля.

Точно соблюдать указанное соотношение $L : h$ не обязательно. Отступление от этого соотношения может быть обусловлено размерами помещения, желаемым качеством освещения, уменьшением теней (уменьшая L) и т. д.

Светильники с люминесцентными лампами следует размещать рядами (сплошными или с незначительными интервалами между ними) вдоль продольной оси помещения или параллельно стене с окнами. Расстояние между рядами светильников определяется по таблице 51.

При использовании люминесцентных ламп, как и при лампах накаливания, расстояние от крайних светильников или крайних рядов светильников до стен принимается в пределах $(^1/_2 \div ^1/_3)L$ в зависимости от того, что находится у стен: рабочие места или проходы.

Расстояние между светильниками наружного освещения выбирают из условий минимума общих эксплуатационных расходов.

Светильники с лампами ДРЛ нужно подвешивать на высоте не менее 4 *м* при мощности менее 400 *вт* и не менее 6 *м* — при большей мощности.

Таблица 48

Наименьшая высота подвеса над полом светильников с лампами накаливания в установках внутреннего освещения

Светильник и его характеристика	Наименьшая высота подвеса над полом (*м*)		
	в матированной колбе до 150 *вт*	в прозрачной колбе	
		200 *вт* и меньше	свыше 200 *вт*
«Универсаль» с диффузным отражателем без рассеивателя с защитным углом 10—30°, а также типа ПУ (промышленный уплотненный) и аналогичные	2,5	3	4
То же, но с рассеивателями, с коэффициентом пропускания до 80% в зоне 0—90°	—	2,5	3,5
«Альфа», глубокоизлучатель эмалированный и аналогичные без рассеивателей с защитным углом более 30°.	Не ограничивается		3
«Люцетта» цельного молочного стекла	2,5	3	4
Шары, плафоны	—	2,5	3
Зеркальные глубокоизлучатели . . .	2	2,5	3
Зеркальные широкоизлучатели . . .	3,5	4	6
Открытые лампы в патронах с колбой матированного стекла, зеркальные лампы без арматуры . .	—	4	6

Примечание. Светильники с защитным углом менее 10° без рассеивателей с лампами в прозрачных колбах не применяются.

§ 8. Виды и системы освещения

По своему назначению освещение может быть основным, или рабочим и аварийным.

По характеру исполнения различают три системы рабочего освещения: общее освещение, местное и комбинированное.

Общее освещение освещает все помещение или его часть более или менее равномерно на всех его участках. Светильники располагают равномерно вдоль помещения или локализованно. При локализованном расположении светильников достигается большая осве-

Таблица 49

Наименьшая высота подвеса над полом светильников с люминесцентными лампами в установках внутреннего освещения

Характеристика светильника	Наименьшая высота подвеса (*м*) при числе ламп в светильнике или светящейся полосе	
	4 и менее	более 4
Светильники с защитным углом в продольной и поперечной плоскостях, создаваемым отражателем или решетчатым затенителем:		
менее 15°	Не допускается	
15—25°	4	4,5
25—40°	3	3,5
более 40°	Не ограничивается	
Светильники с рассеивателями в зоне 0—90° с коэффициентом пропускания рассеивателей:		
менее 55%	2,6	3,2
55—80%	3,5	4

Таблица 50

Наименьшая высота подвеса светильников над уровнем земли на площадях, улицах, дорогах и проездах

Характеристика светильника	Наименьшая высота (*м*)
Светильники с защитным углом не менее 10° с лампой мощностью менее 150 *вт*	5,5
То же, с лампой 150 *вт*	6,0
» » » » 200—300 *вт*	6,5
» » » » 500—700 *вт*	7,5
» » » » 1000 *вт* и выше	8,5
Светильники с замкнутыми светорассеивающими стеклами	4,0
Светильники у входов в здания с лампами мощностью до 60 *вт*	2,5

щенность на определенных участках помещения и меньшая освещенность от этих же светильников на других участках помещения.

Местное освещение предназначается только для рабочих поверхностей. Светильник устанавливают на

Таблица 51

Выбор расположения светильников

Тип светильника	Отношение расстояния между светильниками (а при расположении рядами — между рядами светильников) L к расчетной высоте подвеса h	
	наивыгоднейшее	наибольшее допустимое
Зеркальные лампы глубокого светораспределения, люминесцентные светильники с решетчатым затенителем, создающим защитный угол 30° и более	1,1—1,3	1,4
Глубокоизлучатель эмалированный, «Люцетта», «Альфа»	1,6	1,8
«Универсаль», промышленный уплотненный и аналогичные при наличии отражателей	1,8	2,5
Светильники с горизонтальными люминесцентными лампами	1,4	1,5
Фарфоровый полугерметический шар молочного стекла, плафоны одно- и двухламповые, промышленный уплотненный и аналогичные — при отсутствии отражателей	2,3	3,2

рабочем месте в непосредственной близости от поверхности, которую он должен освещать. Местное освещение рабочей поверхности дополняется, как правило, общим освещением помещения. Устраивать только местное освещение запрещается.

К о м б и н и р о в а н н о е о с в е щ е н и е — это сочетание общего и местного освещения.

Обычно комбинированное освещение требует меньшей мощности, но дороже по первоначальным затратам, чем одно общее. Комбинированное освещение целесообразно применять при высокой точности работ, малой площади рабочих мест, редком их расположении.

Если технологический процесс по своему характеру не требует напряжения зрения (освещенность 30—50 *лк*), то система общего освещения более целесообразна, так как она требует меньших капитальных затрат. Если в помещении есть определенные рабочие места больших размеров, но работа не слишком точная, следует применять

общее локализованное освещение. При устройстве комбинированного освещения освещенность на рабочей поверхности от светильников общего освещения должна составлять не менее 10% от нормы комбинированного освещения, но не менее 100 *лк* при люминесцентных лампах и 30 *лк* при лампах накаливания.

Аварийное освещение предусматривается, помимо основного рабочего, в тех помещениях и на площадках, где отсутствие света может послужить причиной взрыва, пожара, может привести к длительному расстройству технологического процесса или нарушить снабжение потребителей электроэнергией, водой и т. д. Это освещение должно создавать освещенность не менее 10% от нормированной для общего рабочего освещения лампами накаливания. Аварийное освещение для эвакуации людей из помещения выполняют по линиям основных проходов и на ступеньках лестниц. Оно должно обеспечивать освещенность не менее 0,3 *лк*, а на открытых пространствах — не менее 0,2 *лк*. Светильники аварийного освещения включают вместе со светильниками основного освещения, что создает нормированную рабочую освещенность. Аварийное освещение можно использовать и как дежурное или охранное освещение в нерабочее ночное время.

§ 9. Простой способ расчета освещения лампами накаливания

Для приближенного, но практически вполне приемлемого подсчета мощности, потребной на освещение, можно пользоваться нормами удельного расхода мощности на электрическое освещение в *вт/м*^{2} (табл. 52).

Расчет освещения в целом ведут в такой последовательности (пользуясь таблицами).

1. Выбирают тип светильника для данного помещения.
2. Выбирают наивыгоднейшее расположение светильников.
3. Определяют мощность каждого из светильников по формуле

$$P_л = \frac{pS}{N}, \qquad (233)$$

где S — площадь помещения (*м*^{2});

Таблица 52

Рекомендуемые удельные мощности на освещение

Потребители	Удельная мощность (*вт* на 1 м² площади по наружному обмеру) для осветительной и бытовой нагрузок		Средняя мощность светоточки (*вт*)	Годовое число часов использования установленной мощности
	установленная, $p_{уст}$	максимальная, для расчета сети и выбора мощности подстанций		
I. Общественные помещения				
Сельсовет	18	9	100	800
Контора, дом приезжих, чайная	16	8	100	800
Магазин, больница	21	10	100	800
Столовая	21	10	130	800
Хлебопекарня	22	11	130	800
Детский сад, ясли	24	12	140	800
Школа	30	15	150	800
Клуб, отделение связи	27	13	100	800
Библиотека	17	8	100	800
Баня	33	15	150	800
Прачечная	25	12	110	800
II. Производственные помещения				
Гараж	11	5	100	800
Пожарное депо	8	4	100	800
Слесарно-механическая мастерская	12	6	150	1500
Деревообделочная мастерская	12	6	150	1500
Мельница	14	7	150	800
III. Животноводческие помещения				
Коровник с доильной площадкой	3,3	1,6	60	700
Доильная площадка	13	8	100	700
Коровник при доении в стойлах	5,5	2,5	90	700
Лаборатория, молочная	15	7	100	700
Телятник	3,7	1,8	75	700
Свинарник-маточник	3,3	1,6	75	700
Свинарник-откормочник	2,6	1,3	75	700
Скотный двор для откорма на мясо	2,2	1	60	700
Овчарня для овцематок	2	1	60	700
Конюшня	2,3	1	60	700
Птичник с дополнительным освещением, цыплятник	5	3	75	700

Продолжение

Потребители	Удельная мощность (*вт* на 1 *м*² площади по наружному обмеру) для осветительной и бытовой нагрузок		Средняя мощность светоточки (*вт*)	Годовое число часов использования установленной мощности
	установленная, $p_{уст}$	максимальная, для расчета сети и выбора мощности подстанций		
Кормоприготовительная	7	5	100	700
Пункт искусственного осеменения животных	6	4	75	700
IV. Складские помещения				
Зерно и овощехранилище	2	1	100	600
Яйцесклад	6	3	100	600
Склады оборудования и материалов . .	3	1	100	600
Весовая	12	8	150	600
Склад минеральных удобрений	2	1	100	600

N — число светильников, исходя из наивыгоднейшего их размещения;

p — удельная мощность на освещение ($вт/м^2$) (табл. 52).

В таблице приводится удельная мощность на освещение в *вт* на 1 *м*² по наружному обмеру. При расчетах соотношение между площадью по наружному обмеру и полезно освещаемой площадью следует принимать равным 1,2—1,25.

§ 10. Осветительные сети

Для питания осветительных устройств нельзя применять напряжение, превышающее 250 *в* по отношению к земле. Для местного освещения это напряжение может быть использовано только в помещениях без повышенной опасности поражения электрическим током. При повышенной опасности поражения для местного освещения применяется напряжение 36 *в* и менее (гл. XIX).

Если светильники устанавливаются на высоте менее 2,5 *м* в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных, их можно включать в сеть 127—220 *в* только в том случае, если конструкция светильников исключает возможность случайного прикосновения к патронам или лампам. Это может быть достигнуто при помощи установки защитных сеток и стекол, снять которые невозможно без специальных приспособлений. Если защитных устройств нет, напряжение светильников не должно превышать 36 *в*.

Аварийное освещение можно питать от того же трансформатора, что и рабочее (при отсутствии другого трансформатора). По экономическим соображениям аварийное освещение (щитки) можно питать от силовых магистралей или питающих линий рабочего освещения, не предназначенных для питания тех же помещений или его частей. Если в здании имеется единственный ввод, то цепи рабочего и аварийного освещения, выполненные раздельно, можно питать от общего ввода. Охранное освещение питается от самостоятельной линии.

Электрические сети, предназначенные для освещения, подразделяются на питающие и групповые. Питающая сеть — та часть сетей, которая идет от подстанции до групповых щитков. Групповая сеть — это участки сети от групповых щитков до светильников.

Все осветительные сети должны иметь защиту от токов короткого замыкания, а в ряде случаев и от перегрузки. Защиту от перегрузки нужно выполнять только в следующих случаях: а) для сетей внутри помещений, выполненных открыто проложенными незащищенными изолированными проводами с горючей оболочкой; б) для сетей в пожароопасных и взрывоопасных помещениях, а также взрывоопасных наружных установок; в) для осветительных сетей и сетей бытовых и переносных электроприемников в жилых и общественных зданиях, торговых помещениях и служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий.

Осветительные сети можно защищать автоматическими выключателями (автоматами) или плавкими предохранителями. Автоматы должны иметь электромагнитный расцепитель для защиты от коротких замыканий и тепловой — от перегрузок. Автоматы, имеющие только электромагнитный мгновенно действующий расцепитель, применять

не рекомендуется. Для осветительных сетей целесообразно применять комплектные распределительные пункты серии ПР-9000, укомплектованные автоматами А3161 и А3163 с тепловыми нерегулируемыми расцепителями и СУ9000 с автоматами А3114/1, А3124, А3134/1, А3144 с комбинированными (тепловым и электромагнитным) нерегулируемыми расцепителями, а также ящики с автоматами Я3161 и Я3163, осветительные щитки ОЩ и ОЩВ с установленными на них автоматами А3161 и А3163, осветительные щитки для жилых зданий этажные типа ЭЩ-7, квартирные типа ЩК-12, ПК2-25, которые оснащены автоматами АБ-25.

Для надежного отключения при коротком замыкании с наименьшим временем отключения необходимо, чтобы ток короткого замыкания в конце линии не менее чем в 3 раза превышал номинальный ток аппарата защиты. А во взрывоопасных помещениях это отношение должно быть не менее 6 для автоматов и 4 для предохранителей.

Для селективности защиты номинальные токи плавких вставок или уставок автоматов каждого последующего по направлению тока рекомендуется принимать не менее чем на две ступени ниже предыдущего.

Светильники рабочего освещения должны быть соединены в такие группы, чтобы все их токоприемники можно

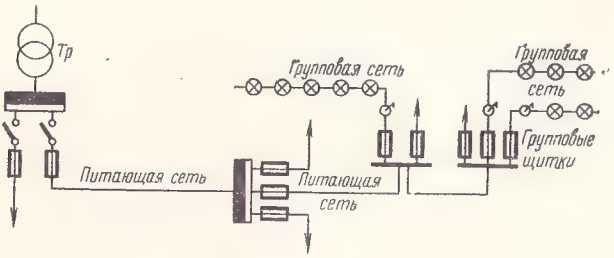


Рис. 277. Осветительная сеть

было включать одновременно. Нельзя объединять светильники производственных и конторских помещений и т. д. Если группы светильников включаются и отключаются одновременно, то на щитках должны быть установлены, кроме предохранителей, выключатели групп (рис. 277).

§ 11. Уход за электроосветительными приборами

Основные правила по уходу за светильниками следующие.

1. Осветительную арматуру можно использовать только с теми лампами, для которых она предназначена. Использование ламп большей мощности может привести к быстрому износу арматуры и лампы из-за перегрева. Вентиляция светильников рассчитана только на определенную мощность ламп. Перегрев вызовет быстрое старение изоляции проводов, введенных в светильник, перегрев патрона и цоколя лампы, размягчение цокольной мастики и выпадение колбы из цоколя. Могут также растрескаться стекло и эмаль отражателя.

2. Светильник должен быть полностью укомплектован. Отсутствие в светильниках отражателей и защитных стекол может привести к слепящему действию светильника.

3. Арматуру нужно надежно укреплять. Стеклянные колпаки большого размера крепят на арматуре дополнительной сетью из тонкой проволоки. Патрон не должен проворачиваться при ввертывании и вывертывании ламп. Лампу ввинчивать до отказа. Плохие контакты, в частности между цоколем и патроном, могут быть причиной недопустимого нагрева лампы, патрона и проводов, а также размягчения мастики цоколя из-за перегрева.

4. Для лучшей светоотдачи светильников необходимо своевременно очищать их от пыли, копоти и грязи. Чистить следует два раза в год в установках наружного освещения, один раз в месяц в установках, находящихся в чистых помещениях, два раза в месяц в помещениях с небольшим содержанием пыли, дыма и копоти (мастерских и др.) и четыре раза в месяц в помещениях с большим содержанием пыли, дыма, копоти, волокон и т. д. (кузнечных, мельницах, пенькотрепальных и др.).

Для очистки от сухой пыли светильники продувают ручными механизмами, а внутреннюю отражающую поверхность и лампу протирают мягкой сухой тряпкой. От грязи светильники очищают тряпкой, смоченной в керосине. Стеклянные элементы арматуры промывают в теплой воде с мылом, протирают тряпкой и выветривают досуха.

5. Осматривать светильники и чистить можно только при отключенных от источника питания линиях.

6. Светильники, в том числе и лампы, должны быть защищены от сотрясения и толчков при помощи пружинящих подвесов (на кранах, у лесопильных рам и т. д.).

7. Для лучшего использования светового потока и электроэнергии на электроосвещение в целом необходимо следить за чистотой стен и потолков в помещениях, своевременно очищать их от пыли и копоти или белить и красить заново.

§ 12. Производственное использование электрического света

Использование электрического света для борьбы с насекомыми-вредителями. Метод борьбы с насекомыми — вредителями полей, садов и огородов с использованием светоловушек дает максимальный эффект с одновременным применением химических средств уничтожения насекомых.

Простейшее приспособление для улавливания насекомых, летающих в ночное время, состоит из противня или корыта с водой с размещенной над ними лампой накаливания в арматуре типа «альфа» или «глубокоизлучатель». В воду добавляют керосин или ядовитые вещества. Насекомые летят на свет (отражение лампы в воде) и гибнут. Мощность лампы в отражателе — 60—100 *вт*. Для привлечения насекомых с большой площади сада или огорода вблизи от ловушки целесообразно на высоте 6 *м* устанавливать электролампу 25 *вт*.

Другой тип светоловушки — электрическая лампа — устанавливается у раструба с небольшим вентилятором, который засасывает насекомых, летящих на свет лампы, в марлевый мешок.

Весьма перспективно использование высоковольтных истребителей насекомых совместно с источником света (рис. 278). Высоковольтный истребитель представляет собой сетку из параллельных проволок (стальных или латунных) диаметром 1,5—2 *мм*, расположенных друг от друга в 8—9 *мм* и хорошо изолированных друг от друга (рис. 278, *а*). К проволокам через одну подводится напряжение 2—2,5 *кв* от повысительного трансформатора небольшой мощности, например типа ТГ-10/20 (рис. 278,*в*). Насекомое, летящее на свет через сетку, попадает под напряжение между двумя соседними проволоками и гибнет.

Ток короткого замыкания между проводами сетки не должен превышать 20 *ма*, чтобы избежать возможного поражения человека или животного. Такие сетки могут быть эффективно использованы и в дневное время при установке их на окнах животноводческого по-

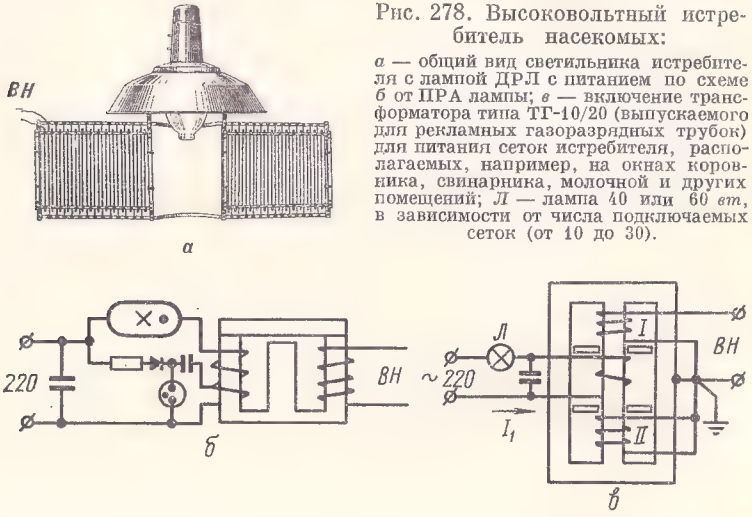


Рис. 278. Высоковольтный истребитель насекомых:

а — общий вид светильника истребителя с лампой ДРЛ с питанием по схеме *б* от ПРА лампы; *в* — включение трансформатора типа ТГ-10/20 (выпускаемого для рекламных газоразрядных трубок) для питания сеток истребителя, располагаемых, например, на окнах коровника, свинарника, молочной и других помещений; *Л* — лампа 40 или 60 *вт*, в зависимости от числа подключаемых сеток (от 10 до 30).

мещения или у приманки с сильным запахом, привлекающим насекомых. Изготавливать и устанавливать высоковольтные истребители, а также внимательно следить за их состоянием следует квалифицированным электрикам. При установке сеток на доступной для касания высоте их необходимо ограждать деревянными или металлическими решетками. Особенно тщательно должен быть изготовлен и налажен трансформатор. Ток короткого замыкания трансформатора снижают до 20—25 *ма* подбором магнитного шунта из пластин трансформаторного железа, устанавливая его между стержнями трансформатора, на которых раздельно располагаются первичная сетевая обмотка и вторичная высоковольтная (ВН).

Использование электрического освещения в птичниках для удлинения светового дня. В короткие дни осенне-зимнего периода яйценоскость птицы (в частности, кур) значительно снижается вследствие снижения жизнедеятельности птицы. Для увеличения яйценоскости эффек-

тивно используется добавочное электрическое освещение. В средней полосе Советского Союза добавочное электрическое освещение в птичниках рекомендуется использовать с октября до марта, включая его с 5—6 *ч* утра до полного рассвета и с наступлением сумерек до 20—21 *ч*. При использовании ламп накаливания для этой цели рекомендуемая норма расхода мощности 4—5 *вт* на 1 $м^2$ пола птичника. Лампы выбирают 60—100 *вт*, высота подвеса 2 *м*, расстояние между лампами 3 *м*. При номинальных условиях расход в среднем на курицу составляет 1,3—1,5 *квт·ч* в год. Яйценоскость кур повышается на 15—20% (годовая).

Выключать лампы на ночь следует постепенно, чтобы дать птицам время разместиться на насестах. Для этой цели пользуются следующими способами.

1. Выключение света «миганием», то есть периодическим включением и выключением, пока куры не расположатся на насестах. Этот способ имеет тот недостаток, что контакты выключателя быстро изнашиваются и сокращается срок службы ламп.

2. Выключение сперва части ламп (50—70%) на некоторое время, а затем «малого света» (рис. 279), когда куры разместятся на своих местах. Интенсивность «малого света» может быть подобрана путем наблюдения. Эта схема может быть переведена на автоматическое управление, если вместо выключателей использовать специальные контактные часы, которые выключали бы лампы по заданному графику.

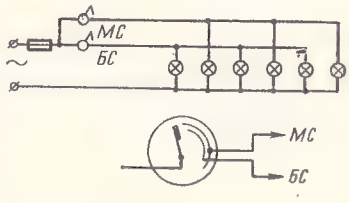


Рис. 279. Схемы включения ламп в птичнике по способу «малый» (МС) и «большой» (БС) свет.

3. Для постепенного выключения света можно пользоваться ползунковым реостатом, тенителем с автотрансформатором по типу тех, что используются для освещения сцены в театрах. Однако эти устройства дорогие.

Дополнительное освещение в теплицах и оранжереях. Свет играет большую роль в жизни растений. С помощью света и зеленого вещества листа растения — хлорофилла — происходит процесс фотосинтеза — накопления углево-

дов из углекислоты воздуха и в виде зеленой массы растений и плодов.

В зимний период, когда солнце не дает достаточного по интенсивности и продолжительности освещения, в остекленных теплицах и оранжереях естественное освещение можно заменить искусственным. Лучшие результаты достигаются в том случае, когда источник света, подобранный по интенсивности и по спектральному составу, наиболее полно удовлетворяет данное растение. Для выращивания рассады огурцов и томатов наиболее подходящая освещенность 9—10 тыс. *лк*, а для взрослых растений освещенность должна быть не менее 8 тыс. *лк*.

Многие северные растения плохо развиваются на юге. Это так называемые растения длинного дня. На севере летом день более продолжительный, чем на юге, и поэтому продолжительность темного периода в сутки более 8—10 *ч* задерживает развитие растения, его цветение и плодоношение. И наоборот, растения короткого дня задерживаются в развитии из-за недостаточной продолжительности ночного времени (минимум 10 *ч*). Это свойство многих растений, особенно цветов, широко используется для ускорения или отсрочки их зацветания, по мере необходимости. Для этой цели требуемая освещенность может не превышать нескольких сотен люксов.

Искусственное освещение широко применяется при выращивании рассады овощей, главным образом помидоров и огурцов. Для этой цели применяются зеркальные лампы накаливания, люминесцентные лампы (предпочтительнее ЛБ), лампы ДРЛ. Разрабатываются специальные лампы для светокультуры, в том числе лампы, аналогичные ДРЛ, но с зеркальной верхней частью колбы, а также ксеноновые лампы мощностью 3—6 *квт*. В настоящее время предпочтение следует отдавать лампам ДРЛ (250—500 *вт*), люминесцентным лампам ЛБ-40 и ЛБ-80 с бесстартерной схемой зажигания. Нормальные лампы накаливания применять экономически нецелесообразно. Вместо них могут быть использованы зеркальные лампы накаливания. Причем если нормальные лампы накаливания используют обязательно в движении, чтобы не вызвать ожогов у растений (или подвешивают их слишком высоко), то зеркальные лампы накаливания могут быть установлены неподвижно с определенными высотой и уг-

лом наклона колбы. Зеркальный отражательный слой колбы позволяет во много раз лучше использовать световой поток, чем любая арматура с нормальной лампой накаливания.

Спектр ламп дневного и белого света подобен спектру дневного рассеянного света. Благодаря трубчатой форме люминесцентные лампы равномерно освещают растение. Они не перегревают его, даже соприкасаясь с ним. По внешнему виду растения, выращенные под люминесцентными лампами, мало отличаются от выращенных летом при солнце. Для дополнительного освещения в теплицах люминесцентные лампы включают группами по 10—15 штук на специальных рамках.

Рамку для ламп изготавливают из сухого, пропитанного олифой, прочного дерева (дуба, бука и др.). Электрическую проводку выполняют проводом в полихлорвиниловой изоляции. Монтажные провода укладывают в паз рамки. Провода, идущие на дроссели или трансформаторы, собирают жгутом и на них надевают резиновый шланг. Концы собирают на многоштырьковую переходную колодку. Дроссели устанавливают в общем ящике. Дроссельный ящик изготавливают из досок. В дне и крышке просверливают отверстия для охлаждения. Рамки над стеллажами устанавливают на любой высоте при помощи блоков.

Для дополнительного освещения растений в теплицах промышленность выпускает специальные светильники типов: ОСТ-10-40 с десятью люминесцентными лампами мощностью 40 *вт* и десятью лампами накаливания НБ-127-40 (127 *в*, 40 *вт*), которые включаются последовательно с люминесцентными лампами вместо балласта (в сеть 220 *в*); ОСТ-1-500 и ОСТ-1-1000 соответственно с лампами ДРЛ-500 и 1000 *вт*.

Спектр люминесцентных ламп беден тепловыми лучами (с длиной волны от 0,7 *мк* и более), поэтому температура стекла не превышает 40—45°. Это позволяет пользоваться экраном из белого картона или бумаги, укладываемым непосредственно на рамку с лампами. Экран увеличивает световой поток, идущий книзу. Освещенность растений увеличивается в 1,5—1,6 раза.

Для освещения растений высотой 50—60 *см* и более рамки с лампами рекомендуется располагать вертикально.

При соблюдении требуемого светового и температурного режимов сроки выращивания рассады в зимние месяцы сокращаются вдвое: рассаду помидоров получают за 30—35 дней вместо 60, огурцов — за 15—18 дней вместо 30—35 и т. д.

Рассаду помидоров начинают освещать сразу же после появления всходов. Продолжительность освещения 8—10 *ч*/сутки, чтобы общая длина светового периода была равна 15—16 *ч*. Для рассады огурцов необходимая продолжительность светового периода 12—14 *ч*.

Электрическое освещение полевых работ в ночное время. Тракторный агрегат освещают специальными лампами накаливания типа ТН низкого напряжения на 6 или 12 *в*, мощностью до 10—15 *вт*. В качестве источников тока служат генераторы, устанавливаемые на тракторах. В качестве светильников используются фары или софиты.

Для освещения молотильного тока (от сети) используют светильники с арматурой наружного освещения с лампами 200—300 *вт*, глубокоизлучатель с лампой 300—500 *вт*, фарфоровый полугерметический с лампами 60 *вт*. Светильники располагают так, чтобы хорошо были освещены все рабочие места. Для освещения скирд соломы рекомендуется использовать прожекторы типа ПЗС-35 с лампами по 500 *вт*.

Глава XXVI

Использование ультрафиолетовых, инфракрасных и других излучений в сельском хозяйстве

§ 1. Диапазон ультрафиолетовых лучей. Источники ультрафиолетового излучения

Источником ультрафиолетовых лучей в природных условиях является солнце. К ультрафиолетовым лучам относят излучения с длиной волны от 10 до 380 *ммк*. Коротковолновые ультрафиолетовые лучи солнца интенсивно поглощаются озоном, находящимся в верхних слоях

атмосферы. Лучи с волной короче 290 *ммк* практически не доходят до поверхности земли.

Ультрафиолетовые лучи играют очень важную роль в биологических процессах. Они необходимы и людям и животным. Их недостаток, особенно в северных широтах, болезненно переносится организмами людей и животных. Естественная ультрафиолетовая недостаточность в этом случае может быть компенсирована излучениями искусственных источников.

Диапазон ультрафиолетовых излучений делится на три области: A, B и C. Область A — длинноволновой или ближней (к видимым лучам) ультрафиолетовой радиации с длинами волн от 380 до 320 *ммк* непосредственно примыкает к фиолетовому участку солнечного спектра. Излучения этой области используют для люминесцентного анализа, а также для возбуждения светящихся веществ в сигнальных и других устройствах. Биологическая активность этих излучений относительно невелика.

Область B является областью средневолновой ультрафиолетовой радиации с длинами волн примерно от 320 до 275 *ммк*. Излучения этой области оказывают благотворное действие (при определенных дозах облучения) на животные организмы. Излучения с длинами волн короче 315 *ммк* способны превращать провитамин D в активно действующий витамин D. Этот витамин управляет отложениями солей кальция в костных тканях животных.

К области C — коротковолновой или дальней ультрафиолетовой радиации — относятся излучения с длинами волн от 275 *ммк* и короче. Лучи этой области имеют сильное бактерицидное действие. Они используются для стерилизации воздуха, воды, посуды и т. д. Они также используются для возбуждения светящихся составов в люминесцентных лампах. На растения эти лучи действуют губительно.

Мерой мощности ультрафиолетового излучения является ультрафиолетовый поток. Бактерицидное излучение оценивается значением бактерицидного потока, единица которого — бакт (*б*) — численно равна потоку ультрафиолетового излучения с длиной волны 254 *ммк* и мощностью 1 *вт*. Аналогично существуют термины эритемный поток и антирахитный поток. Для их измерения принята единица измерения эр (*эр*), который равен по-

току ультрафиолетового излучения с длиной волны 297 *ммк* и мощностью 1 *вт*.

На рисунке 280 представлены кривые относительной эффективности ультрафиолетовых излучений в зависимости от длины волны. Эритемное действие излучений в пределах длин волн 280—320 *ммк* благотворно влияет на человеческий организм. Характер эритемного действия излучений короче 280 *ммк* пока недостаточно хорошо изучен. Кривая антирахитной эффективности носит ориентировочный характер, так как она недостаточно точно определена для лучей с различной длиной волны.

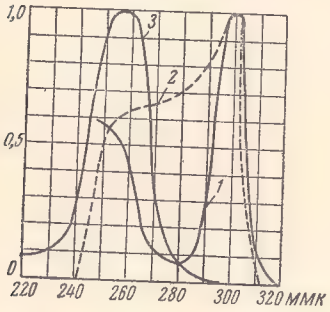


Рис. 280. Кривые относительной эффективности ультрафиолетовых излучений в зависимости от длины волны:
1 — эритемная; *2* — антирахитная; *3* — бактерицидная.

Существует ряд методов генерирования ультрафиолетовых лучей.

Метод температурного излучения используется в лампах накаливания. Можно использовать также электрическую дугу. Температурные источники имеют сплошной спектр, максимум которого располагается соответственно температуре излучателя. В лампах накаливания температура излучения лежит примерно на уровне 2800° К. Поэтому излучение в ультрафиолетовой области незначительно. У ламп с колбами из обычного стекла практическое использование находят ультрафиолетовые лучи области А.

Метод генерирования ультрафиолетовых лучей через электрическое возбуждение газов и паров металлов используется в ртутных и других газоразрядных лампах. Принцип излучения в газоразрядных лампах был рассмотрен выше. Излучения возникают при переходе атома из возбужденного в нейтральное состояние. Причем чем выше скорость движения электронов в лампе и чем больше степень возбуждения атомов, тем короче волна излучения. Вследствие вышеизложенного в ртутных лампах, предназначенных для генерирования коротковолновых

(бактерицидных) излучений, применяют низкие давления (менее 1 *мм рт. ст.**). При низком давлении возможность столкновения электрона с атомом мала и электрон до столкновения успевает приобрести высокую скорость. Для генерирования средневолновых ультрафиолетовых лучей применяют лампы с внутренним давлением паров ртути порядка 400—700 *мм рт. ст.* Для генерирования видимых излучений используют лампы сверхвысокого давления (СВД) с давлением паров ртути при рабочем состоянии до 100 *ат.* В этих лампах значительной величины достигает температурное излучение, и спектр излучения приближается к сплошному.

Метод генерирования ультрафиолетовых лучей посредством люминесценции применяется, например, в эритемных лампах из увиолевого стекла (ЭУВ). Ультрафиолетовые излучения области В генерируются в результате люминесценции специального люминофора, нанесенного на внутреннюю поверхность трубки лампы низкого давления. Этот метод наиболее экономичен для получения излучений области В. Ниже рассматриваются источники ультрафиолетовых излучений, нашедшие практическое применение в сельском хозяйстве.

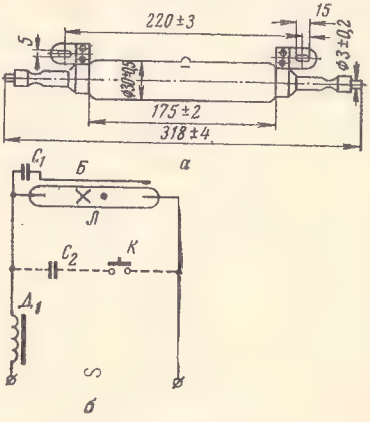


Рис. 281. Лампа ПРК-2 (*а*) и схема ее включения (*б*).

1. Ртутно-кварцевая лампа типа ПРК (прямая ртутно-кварцевая, рис. 281, *а*) представляет собой трубку из плавленого кварца, заполненную газом аргоном при низком давлении и небольшим количеством ртути. При горении лампы давление паров ртути поднимается до 1 *ат.* На концах трубки впаяны электроды из вольфрама, обвитые спиралью со слоем оксида. Во время работы лампы между электродами возникает дуго-

* *рт. ст.*— ртутного столба.

вой разряд. Схема включения лампы представлена на рисунке 281, *б*.

Лампы ПРК используют в сети переменного тока 127 или 220 *в*. Нормальное положение ламп при работе — горизонтальное. Режим работы устанавливается через 8—15 *мин* после включения. Лампы ПРК дают мощный поток ультрафиолетовых лучей с длинами волн от 240 *ммк* до границ видимого спектра. Они применяются с профилактической и лечебной целью в медицине, а также для бактерицидного и эритемного облучения в животноводческих помещениях, в первую очередь молодняка. Эти лампы применяются также для люминесцентного анализа. Срок службы ламп ПРК не менее 800 *ч*.

Основные параметры ртутно-кварцевых ламп при эксплуатации в сетях переменного тока приведены в таблице 53.

Установившийся режим наступает при полном испарении паров ртути. Цепь в схеме включения лампы, состоящая из кнопки К и конденсатора C_2, имеет назначение облегчить зажигание лампы. При нажатии кнопки в цепи дросселя $Д$ и конденсатора C_2 проходит ток. При размыкании кнопки магнитное поле дросселя исчезает и наводит импульс э. д. с., больший, чем напряжение сети. Этот импульс пробивает промежуток между электродами в лампе, и она загорается. При нормальной окружающей температуре эта цепь не используется. Разряд возникает при сетевом напряжении. Конденсатор C_1 и металлическая полоска $Б$ также предназначены облегчить зажигание лампы.

Таблица 53

Ртутно-кварцевые лампы

Тип лампы	Номинальное напряжение сети (*в*)	Пусковой ток (*а*)	Продолжительность разогрева наибольшая (*мин*)	Установившийся режим		
				ток лампы (*а*)	напряжение на лампе (*в*)	мощность (*вт*)
ПРК-2	220	6	15	3,75±0,25	120±6	375±13
ПРК-4	127	5	10	3,75±0,3	70±5	220± 8
ПРК-5	220	4,2	15	2,3±0,15	120±6	240±11
ПРК-7	220	14	10	8,5±0,5	135±6	1000±40

Максимум излучения ртутно-кварцевых ламп при давлении 1 *ат* приходится на спектральную линию 365 *ммк*.

2. Эритемные люминесцентные лампы типа ЭУВ-15 и ЭУВ-30 устроены подобно обычным люминесцентным лампам ДС или БС, но отличаются от них составом люминофора и сортом стекла трубки. Состав люминофора подбирается так, чтобы он излучал в пределах 280—380 *ммк*, что соответствует недостающему зимой ультрафиолетовому излучению солнца. Максимум излучения лежит в пределах 310—320 *ммк*. Излучение этой лампы богато не только эритемным действием, но и антирахитным, так как относительные эритемная и антирахитная эффективности в значительной мере совпадают. В спектре лампы отсутствует коротковолновый ультрафиолет. Это является положительным моментом. Трубка лампы выполнена из специального увиолевого стекла, хорошо пропускающего ультрафиолетовое излучение люминофора и не пропускающего лучи с волной 253,7 *ммк* и короче. Обозначение лампы ЭУВ-15 расшифровывается так: эритемная из увиолевого стекла, мощностью 15 *вт*. Лампа потребляет на себя без учета пусковых приспособлений 15 *вт*. При работе лампа дает слабое голубое свечение, что вызывается излучением паров ртути в видимой области спектра, проходящим через слой люминофора. Схема включения лампы аналогична схеме включения люминесцентных ламп дневного или белого света. Эритемные люминесцентные лампы применяются в облучательных эритемных установках для компенсации ультрафиолетовой недостаточности. Наибольшее распространение могут получить облучательные эритемные установки длительного действия, обеспечивающие во всем помещении малую эритемную облученность.

Эритемные облучающие установки длительного действия в первую очередь рекомендуется устраивать: в детских учреждениях (яслях, детсадах, школах); в лечебно-профилактических учреждениях (больницах, санаториях, домах отдыха); в жилищах (общежитиях, интернатах), расположенных севернее 60° широты; в производственных и общественных помещениях, лишенных естественного света; в животноводческих помещениях для облучения молодняка сельскохозяйственных животных и птицы.

Эритемные люминесцентные лампы можно применять комбинированно с люминесцентными лампами, а также

с лампами накаливания. Их можно использовать с искусственным освещением в основном в темные часы суток. В связи с тем что осветительные и эритемные лампы, возможно, будут действовать в разное время, необходимо предусматривать раздельное включение и выключение эритемных и осветительных ламп.

Облучающие установки могут быть выполнены либо с равномерным, либо с локализованным размещением облучающих приборов. При одновременном их использовании с люминесцентными осветительными лампами рекомендуется устанавливать их в общих светильниках. При этом эритемные лампы размещают таким образом, чтобы избежать значительного ослабления ультрафиолетового потока. Для защиты зрения применяют либо светильники с системой плоских пластинок, либо светильники отраженного света. Последние рекомендуются для палат в больницах и в спальных комнатах. Для животноводческих помещений используют открытую корытообразную арматуру.

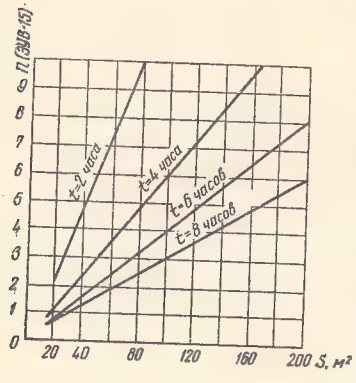


Рис. 282 График для ориентировочного подсчета числа эритемных ламп в облучающих установках в зависимости от площади помещения и продолжительности включения ламп:
E — площадь помещения ($м^2$); t — число часов включения ламп; n — рекомендуемое число ламп ЭУВ-15.

Время действия облучающей установки определяется временем использования данного помещения. Например, производственные помещения используются в течение 8 *ч*, а классные — в течение 4—5 *ч*. Доза подсчитывается как произведение облученности на время действия установки.

Ориентировочно число эритемных люминесцентных ламп мощностью 15 *вт* может быть принято из графика на рисунке 282.

3. Бактерицидные лампы БУВ представляют собой газоразрядные ртутные лампы низкого давления, устроенные подобно лампам ДС, БС и ЭУВ. Трубки выполняются из кварцевого увиолевого стекла, хорошо пропускающего бактерицидные излучения с дли-

ной волны 254 *ммк*. Люминофором трубка не покрывается. Эти лучи вызывают конъюнктивит — болезненное воспаление глаза. Поэтому смотреть на лампу можно только через очки из толстого обычного (неорганического) стекла.

Бактерицидные лампы изготавливают четырех типов: БУВ-15 и БУВ-30 мощностью 15 и 30 *вт* и лампы БУВ-30П и БУВ-60П повышенной плотности тока, номинальной мощностью 30 и 60 *вт*. Средний срок службы ламп—1500 *ч*. В конце срока службы бактерицидный поток составляет не менее 50% номинального.

Схемы включения бактерицидных ламп аналогичны схемам включения эритемных и люминесцентных ламп.

Бактерицидные лампы можно применять: для обеззараживания воздуха помещений лечебных учреждений, бактериологических лабораторий, станций переливания крови, театров и кино, школ, детских учреждений и т. д.; для обеззараживания стен, пола, потолка в помещениях, а также предметов обихода; для обеззараживания питьевой и минеральной воды; для обеззараживания и предохранения от микробного загрязнения пищевых продуктов, оборудования и тары на пищевых предприятиях.

Обеззараживать воздух помещений ультрафиолетовым облучением можно как в присутствии, так и в отсутствие людей. При обеззараживании воздуха в присутствии людей необходимо применять меры к максимальному сокращению бактерицидной облученности на уровне до 2 *м* от пола. Применять неэкранированные («голые») лампы, которые могут оказываться в поле зрения, категорически запрещается.

При обеззараживании воздуха в присутствии людей в высоких помещениях (более 3 *м*) нужно размещать бактерицидные лампы в специальной арматуре на высоте не ниже 2 *м* от пола. Арматура должна направлять бактерицидный поток в верхнюю зону так, чтобы угол между горизонтальной плоскостью, проходящей через лампу, и лучами от нее был не менее 5°.

В соответствии с этими требованиями разработаны специальные настенный (типа НБО) и потолочный (типа ПБО) облучатели. Удельная установленная мощность не должна превышать 0,75—1 *вт* на 1 $м^3$ помещения.

В помещениях с пребыванием в них большого числа людей рекомендуется облучать воздух в течение всего времени пребывания людей. При правильно рассчитанной

установке и правильной ее эксплуатации погибают до 70% общего количества бактерий. Болезнетворные бактерии более чувствительны к лучам, поэтому их гибнет больше. Активность оставшихся бактерий снижается. Если в помещении отсутствует вентиляция и за 1,5—2 *ч* в нем накапливается значительное количество озона, необходимо выключать установку на 30—60 *мин* и проветривать помещение.

Лампы целесообразно размещать на пути конвекции воздуха или в вентиляционных каналах. Их можно также ставить в специальных рециркуляционных установках, через которые прогоняется воздух. Такие рециркуляционные установки представляют собой короткие трубы из жести с бактерицидными лампами внутри и небольшим вентилятором.

Для облучения предметов обихода (посуды, игрушек и т. д.) целесообразно применять переносную облучательную установку с 1—3 лампами БУВ-30П. Предметы облучают в хорошо промытом или очищенном виде не менее 10 *мин*. Для обеззараживания питьевой и минеральной воды лампы размещают как в воздухе, непосредственно над поверхностью воды, так и в самой воде. В последнем случае лампы закрывают кварцевыми чехлами от механических повреждений и непосредственного охлаждения водой.

Установки с лампами используют также для обеззараживания воздуха в продуктовых складах, молочных, инкубаториях, в животноводческих помещениях. В больших складах продуктов принимают удельную мощность, равную 0,3 *вт/м*^{3}. Для малых камер хранения норма может быть увеличена до 2,5 *вт/м*^{3}. Длительность облучения — 12 *ч*/сутки (по 6 *ч*). Для животноводческих помещений норма пока не найдена.

Ультрафиолетовые бактерицидные лучи могут быть использованы для обработки затхлого зерна после длительного хранения или перевозки водным путем. Зерно в этом случае промывают, сушат и облучают. При обеззараживании молока его облучают в тонком слое в течение 10—30 *сек*. После этого молоко хранят при температуре 5°. Целесообразно облучать цитрусовые при хранении. Плоды облучают не ранее чем через 2 месяца после их сбора при температуре 3° в течение не менее 10 *мин*.

При стерилизации тары, предметов

оборудования, рабочих мест неспороносные микроорганизмы за первые 30 *сек* на расстоянии 20 *см* от лампы БУВ-15 погибают на 90—95%. Для уничтожения спор плесени длительность облучения нужно довести до 5—15 *мин*. Шероховатая поверхность, а также ее загрязнение значительно снижают эффективность ультрафиолетового облучения.

Промышленность выпускает для бактерицидного облучения воздуха облучатели типа ОБУ-1-15 и ОБУ-1-30 с лампами соответственно БУВ-15 и БУВ-30.

§ 2. Нормы эритемного облучения сельскохозяйственных животных и птицы. Эффективность облучения

Нормы облучения, приводимые в таблице 54, установлены многократными опытами и рекомендуются секцией по ультрафиолетовому облучению при Академии наук СССР.

Таблица 54

Нормы эритемного облучения животных

Облучаемые животные и птица	Ежедневная доза облучения (*мэр·ч/м²*)
Коровы	180
Телята от рождения до 10-дневного возраста	40
Телята взрослые	100
Свиноматки	180
Поросята подсосные	30
Свиньи откормочные	120
Куры при вольном содержании в птичниках	80
Цыплята при брудерном содержании	10—80 — при ежедневном постоянном увеличении облучения

Эритемная облученность, создаваемая различными источниками ультрафиолетовых лучей, на разных расстояниях от них, приведена в таблице 55.

Пользуясь данными приведенных таблиц, можно рассчитать потребное облучение. Например, для облучения поросят доза (табл. 54) равна 30 *мэр·ч/м²*. Высота под-

Таблица 55

Эритемная облученность (*мэр/м²*)

Тип лампы	Высота подвеса над спиной *(м)*			
	1	1,5	2	4,5
ПРК-2	720	319	180	114
ПРК-4	420	186	105	67
ЭУВ-15	20	8,9	5	3,2
ЭУВ-30	42	18,6	10,6	6,7

веса лампы ЭУВ-15—2 *м*. Из таблицы 55 находим, что эритемная облученность в этом случае равна 5 *мэр/м²*. Чтобы получить дозу облучения 30 *мэр·ч/м²*, необходимо ежесуточно проводить облучение в течение 6 *ч*, то есть

$$5 \text{ мэр/м}^2 \cdot 6 \text{ ч} = 30 \text{ мэр} \cdot \text{ч/м}^2.$$

Животных нужно приучать к облучению постепенно: в течение первых 5 дней давать четверть дозы, затем половину и, наконец, полную дозу.

Солнечный свет имеет важное значение для роста организма. Недостаток его приводит к нарушениям в системе кровообращения и в обмене веществ. Возникает малокровие, развивается рахит. Организм слабеет и становится легко восприимчивым к другим заболеваниям. Рахит, как отмечалось выше, начинается в результате недостатка витамина D. Витамин D образуется в самой коже животного из имеющегося в ней продукта — эргостерина под воздействием ультрафиолетовых лучей. Без ультрафиолетовых лучей организм не вырабатывает витамина D. Искусственное ультрафиолетовое облучение животных и птицы особенно необходимо в осенне-зимний период. Для широт Советского Союза этот период длится с ноября по апрель включительно, когда естественная солнечная радиация недостаточна. Во всех случаях целесообразно устанавливать сроки облучения в зависимости от климатических зон и условий содержания скота.

В результате опытов, проводимых рядом научно-исследовательских учреждений, было установлено, что по сравнению с контрольными у облучаемых поросят привес увеличился на 21—24%, у телят на 18—25%, удойность

коров повысилась на 10—12%, яйценоскость кур — на 20—25%. Наблюдается общее оздоровительное действие, в результате которого снижаются различные заболевания и отход молодняка.

Большой эффект дает также облучение кормов (дрожжей, рыбной муки, молока и т. д.) с целью обогащения их витамином D. Но при этом необходимо строго соблюдать дозировку облучения, так как повышенные дозы облучения приводят к превращению витамина D в ядовитые для животных продукты.

Для облучения животных и птицы можно использовать как стационарные, так и передвижные облучающие установки. В стационарных облучающих установках применяются светильники с лампами типа ЭУВ-15, ЭУВ-30. В передвижных облучающих установках используются лампы типа ПРК-2 и ПРК-4, которые перемещаются вдоль всего помещения специальной приводной станцией и поочередно облучают всех животных прямо в станках.

В птичниках ультрафиолетовое облучение можно осуществить одновременно с удлинением светового дня. Для этой цели наиболее целесообразно использовать эритемные лампы ЭУВ.

При одновременном использовании эритемных ламп ЭУВ и ламп накаливания можно обойтись без дросселей. Лампы накаливания используют вместо дросселей. Две лампы накаливания по 40 *вт* на 127 *в* включают последовательно между собой и с эритемной лампой. При включении в сеть 380 *в* люминесцентная лампа загорается без стартера. Для надежного зажигания на лампы снаружи можно наложить заземленные металлические полоски (из фольги). При этом зажигание возможно даже при +2, +3° окружающей температуры. Один такой комбинированный светильник рекомендуется монтировать из расчета на 15—20 $м^2$ облучаемой площади. При высоте подвеса светильника 2—2,3 *м* на уровне пола создается облученность 10—12 $мэр/м^2$. Необходимая доза ультрафиолетового облучения достигается изменением продолжительности облучения. Схема и общий вид такого комбинированного светильника представлены на рисунке 283.

На птицефабриках, когда куры круглый год содержатся в многоярусных металлических клетках (батареях) и полностью лишены естественного солнечного освещения, для предупреждения рахита и других заболеваний в их

рацион вводят витамин D или проводят систематическое облучение ультрафиолетовыми лучами. Для облучения кур в клетках созданы специальные передвижные установки.

Установка монтируется на самоходной тележке и приводится в движение от электродвигателя. На тележке установлены также барабан с питающим кабелем и две кварцевые лампы ПРК-2 с пусковой аппаратурой. Лампы устанавливаются на разных уровнях, на высоте от пола 0,9 и 2 *м*. Этим обеспечивается равномерное облучение по этажам батареи. Потребляемая из сети мощность равна 1 *квт*, общий вес установки до 80 *кг*. Дозировка регулируется скоростью передвижения установки вдоль клеток.

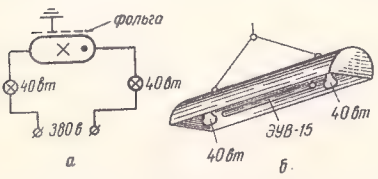


Рис. 283. Комбинированный светильник с эритемной люминесцентной лампой и двумя лампами накаливания:
а — схема; *б* — общий вид светильника.

Расход электроэнергии на облучение одной курицы в месяц составляет 0,06 *квт·ч*. При клеточном содержании кур и цыплят ультрафиолетовое облучение необходимо проводить круглый год.

Промышленностью выпускаются следующие типы облучателей для сельского хозяйства: ЛЭСХ-2-40/30 — с одной люминесцентной (40 *вт*) и одной эритемной (30 *вт*) лампами для животноводческих и птицеводческих помещений; ЭО-1-30 — эритемные облучатели животных и птицы с лампой ЭУВ-30 и лампой накаливания НБ-127, 40 *вт*, включаемой последовательно, вместо балластного дросселя с лампой ЭУВ-30 в сеть 220 *в*.

§ 3. Люминесцентный анализ в сельском хозяйстве

Длинноволновые ультрафиолетовые лучи области А вызывают свечение многих веществ и микроорганизмов, в том числе и сельскохозяйственных продуктов.

Анализ проводят в темном помещении с помощью источника ультрафиолетовых лучей, желательно мощного, например лампы ПРК или СВД в закрытой арматуре из жести, в которой имеется окно с фильтром из черного уви-

олевого стекла (типа УФС-3). Этот фильтр задерживает видимые лучи и пропускает невидимые ультрафиолетовые лучи. Это требуется для того, чтобы относительно слабое свечение не забивалось видимыми лучами и не мешало наблюдению.

Различают сортовой и химический люминесцентный анализ. Сортовым люминесцентным анализом условно называют способ отбора объектов по их свечению без дополнительных химических люминесцентных реакций, с помощью которых можно получить не только качественное, но и количественное определение вещества.

Люминесцентный анализ применяется во многих отраслях народного хозяйства, науке и технике. Очень велики возможности использования люминесцентного анализа в сельском хозяйстве. С помощью люминесцентного анализа может быть выявлено в начальной стадии заболевание картофеля фитофторой. Для анализа на внутренние заболевания разрезают 50 клубней и просматривают в ультрафиолетовых лучах. Наличие в разрезах мест, флуоресцирующих ярко-голубым цветом, указывает на скрытую слабую форму заболевания. Черные пятна с голубыми краями указывают на сильное поражение фитофторой. Подмороженный картофель определяют по белесому свечению.

Можно также определить заболевания и повреждения лука репчатого, чеснока, моркови, свеклы, брюквы и т. д. Люминесцентный анализ позволяет также определить наличие спорыньи в муке, примесь минерального масла к растительному, выявить скрытые формы порчи мяса, рыбы, зерна, определить съедобные, несъедобные и ядовитые грибы, определить качество молока и его продуктов, фруктовых соков и вин, яиц и т. д. Можно правильно распознать отдельные сорта семян, морфологически сходные между собой и трудно различимые по внешним признакам.

Люминесцентный анализ может найти самое широкое применение в различных отраслях социалистического сельского хозяйства. Преимущество метода в том, что анализ проводится быстро, с небольшими затратами средств и материалов.

Простейший аппарат для люминесцентного анализа представляет собой ящик (рис. 284), состоящий из двух

отделений. В верхнем отделении находится ртутно-кварцевая лампа *2* типа ПРК. Между верхним и нижним отделениями устанавливается светофильтр *1* типа УФС-3. В нижней части помещаются исследуемые объекты. Пусковые приспособления могут монтироваться отдельно. Верхняя часть должна иметь хорошую вентиляцию (отверстия в задней части и по бокам и щели с козырьками сверху). Светофильтр нельзя размещать ближе 200—250 *мм* от лампы. Работа проводится в затемненном помещении.

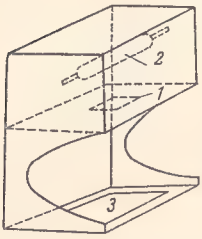


Рис. 284. Схема аппарата для люминесцентного анализа:

1 — окно со светофильтром УФС-3; *2*-лампа ПРК; *3* — место для исследуемого объекта.

Промышленностью также выпускаются установки для люминесцентного анализа.

Настольный ультрафиолетовый осветитель типа КП-1-Н имеет лампу СВД-120А и светофильтр УФС-4 с максимумом пропускания на волне 365 *ммк*.

При проведении работы необходимо следить за тем, чтобы в глаза не попадали прямые лучи от лампы через фильтр. В этом случае начинают люминесцировать ткани глаза. Зрение быстро утомляется, производительность труда падает.

§ 4. Источники инфракрасных лучей

К тепловым инфракрасным излучениям относятся излучения с длиной волны от 0,76 до 240 *мк*. Эти лучи лежат за красными лучами в сторону увеличения длины волны и поэтому называются инфракрасными. Они излучаются всяким нагретым телом. Их природа также электромагнитная. При нагреве тела усиливается колебательное движение молекул, сопровождающееся излучением электромагнитных колебаний, длины волн которых соответствуют инфракрасным лучам.

Солнечный спектр богат инфракрасными лучами, особенно в диапазоне волн от 0,76 до 5 *мк*. На долю этих волн приходится основная часть солнечной тепловой энергии.

В качестве искусственных источников инфракрасных лучей могут быть использованы любые тела, нагретые до высокой температуры. Хорошим источником этих лучей

является обычная лампа накаливания, которая превращает в тепловые лучи до 65% всей подводимой к ней энергии. Но использовать лампы накаливания в качестве источников тепловых лучей неэкономично.

В практике получили распространение специальные лампы накаливания — термоизлучатели, которые предназначаются для сушки лучистой тепловой энергией разных изделий, материалов, окрашенных поверхностей, продуктов и т. д.

Промышленность выпускает лампы-термоизлучатели (зеркально-сушильные лампы) типов ЗС-2 (127 *в*, 250 *вт*), ЗС-1 (127 *в*, 500 *вт*), ЗС-3 (220 *в*, 550 *вт*) и т. д. Эти лампы имеют колбу параболической формы с внутренним зеркальным покрытием. Температура нити накала понижена по сравнению с нормальными осветительными лампами аналогичной мощности, в результате чего срок службы увеличивается до 2000—10 000 *ч* вместо 1000 *ч* у осветительных ламп накаливания.

Тело накала располагается в фокусе параболической части колбы и дает концентрацию лучистого потока в определенном направлении. Эти лампы не требуют дополнительных отражающих устройств, что очень удобно в эксплуатации. Они рассчитаны на использование при температуре окружающей среды не выше 70°. Поэтому цоколи должны защищаться от действия высоких температур. Колбы ламп сверху защищают от попадания холодных капель воды на их раскаленную поверхность, так как это может привести к преждевременной порче лампы. Их нельзя применять в помещениях, содержащих горючие пары и газы.

§ 5. Применение инфракрасных лучей

Инфракрасные лучи хорошо проникают в глубь органического материала. Поэтому их весьма целесообразно использовать для сушки сельскохозяйственных продуктов: фруктов, овощей, зерна, грибов, орехов и т. д. При сушке зерна одновременно можно проводить дезинсекцию от вредителей, например амбарного долгоносика, мучного клеща и т. д. Хорошие результаты дает также сушка древесины. Широкое применение находит в народном хозяйстве сушка лакокрасочных покрытий. Лучи проникают через слой краски, отражаются от металла, и сушка

идет из глубины. Они могут применяться для быстрого прогрева поверхности перед окраской, лужением, пайкой или при посадке деталей в горячем состоянии и т. д.

Хорошие результаты дает использование инфракрасных лучей при воспитании молодняка сельскохозяйственных животных и птицы в холодное зимнее время, а также при лечении животных.

Для облучения поросят в станке отгораживают горизонтальными планками угол площадью 0,5 $м^2$ так, чтобы туда могли свободно заходить только поросята. Лампу ЗС-3 подвешивают на высоте 1 *м* в центре отгороженного места. После рождения поросят первые 3 дня их облучают до 20 *ч* в сутки. Затем время облучения постепенно сокращают до 10 *ч* и менее, в зависимости от наружной температуры. К полуторамесячному возрасту облучение прекращают. При облучении обычно не наблюдается простудных заболеваний, рост идет более интенсивно. К 12—16-дневному возрасту поросята охотно пользуются подкормкой.

Инфракрасные лампы применяются также и для обогрева цыплят в неотапливаемых помещениях. Четыре лампы по 250 *вт* используются в установке на 400 цыплят. Высота подвеса ламп меняется, в зависимости от возраста цыплят, в пределах 40—80 *см*. На первые две недели обогреваемое место должно быть отгорожено небольшим плотным барьером (от сквозняков).

Одним из недостатков использования инфракрасных ламп является отсутствие резервирования тепла на случай перерыва в электроснабжении.

В медицине инфракрасные излучения используются при лечении самых различных заболеваний. Лучи хорошо проникают в ткани и вызывают их нагрев. Усиливается активность клеток ткани. Инфракрасные излучения усиливают кровоток в слоях кожи, увеличивают обмен между кровью и тканями, ускоряют выделение токсинов и вызывают образование пигментов, играющих в организме защитную роль. Через посредство реакций крови и нервной системы облучение воздействует на функции желез и обмен веществ. Поэтому инфракрасное облучение применяется для лечения заболеваний лимфатической системы, суставных заболеваний, абсцессов, экзем и накожных сыпей, а также различных травм и т. д.

§ 6. Общее определение электрокультуры

Под термином электрокультура понимают ряд вопросов, связанных с выращиванием растений при воздействии на их жизнедеятельность электрическими электромагнитными полями. Сюда также следует отнести электроионокультуру — воздействие на растение потоком ионов.

Наиболее ранние опыты по электроионокультуре относятся к середине XVIII века, когда были поставлены первые опыты по исследованию влияния на растения потока ионов атмосферного электричества. С появлением генераторов электрических зарядов высокого потенциала начали проводить опыты по электризации растений, а также по созданию искусственных потоков ионов посредством подведения потенциала к сетке, расположенной над растением и изолированной от земли. В дальнейшем, с развитием электротехники, высокий потенциал на сетку подавался от трансформаторов с высоковольтными выпрямителями. Опытами было показано, что потоки ионов влияют на рост и развитие растений, на ускорение процессов внутри клетки. Прирост урожая достигал более 30%. Но затраты на установку не окупались за счет прироста урожая.

С середины XIX века ставятся опыты по выяснению влияния гальванического тока на растение. Для этой цели создавали гальванические пары непосредственно в почве. Два электрода, например угольный и цинковый, устанавливали в почве и соединяли между собой сверху проводником. Под действием электролитов в почве между электродами протекал ток. Аналогичные опыты проводил И. В. Мичурин, который указывал на возможность использования электрокультуры для гибридизации. В ряде этих опытов наблюдалось прибавление урожайности, сокращение сроков вегетационного периода.

К электрокультуре следует относить также предпосевную обработку семян различными участками спектра электромагнитных колебаний. Наибольшее влияние оказывает воздействие на семена рентгеновских лучей, гамма-лучей (от радиоактивных изотопов), ультракоротких волн метрового диапазона, радиоволн. Малая доза облучения, как правило, увеличивает урожай различных культур и сокращает срок вегетации. Большая доза облучения действует угнетающе.

Особый интерес представляют для этих целей рентгеновские лучи. Для получения их применяются специальные рентгеновские аппараты. Одна из схем такого аппарата представлена на рисунке 285.

Высокое напряжение вторичной обмотки трансформатора *1* выпрямляется газотроном *2*. Выпрямленное напряжение подается на рентгеновскую трубку *3*. Под действием высокого потенциала электроны, образованные катодом *4*, устремляются к антикатоду *5*, представляющему собой пластинку из тугоплавкого металла, расположенную под углом 45° к оси потока электронов. Удар быстрых электронов о твердое тело (антикатод) вызывает поток рентгеновских лучей. Рентгеновские лучи хорошо проходят через организмы, пронизывая атомы, составляющие тело организма, и нарушают при этом систему планетарных электронов этих атомов. При длительном облучении живые клетки погибают. При облучении семян большими и мощными дозами Р-лучей растения получали различные изменения, не свойственные им. Чаще изменения носили отрицательный характер, однако иногда эти изменения были положительными. Р-лучи применяются также в лечении и дефектоскопии (определение дефектов в металлических деталях).

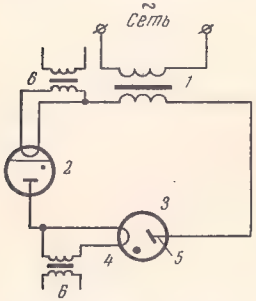


Рис. 285. Устройство рентгеновской установки с одним кенотроном:

1 — повышающий трансформатор; *2* — газотрон для выпрямления тока; *3* — рентгеновская трубка; *4* — катод; *5* — антикатод; *6* — трансформаторы для цепей накала газотрона и трубки.

К лучам Рентгена близки по своим свойствам гамма-лучи, возникающие при радиоактивном распаде. Кроме гамма-лучей, при распаде образуются альфа- и бета-лучи. Альфа-, бета- и гамма-лучи объединяются общим термином «ионизирующие излучения». Они имеют широкую перспективу применения в сельском хозяйстве для стимуляции жизненных процессов в растениях и живых организмах, для получения биологических изменений в живых организмах, включая и получение новых сортов сельскохозяйственных растений, для стерилизации продуктов сельского хозяйства, уничтожения вредителей-насекомых, для контроля за технологическими процессами, сигнализации,

автоматизации, для изучения жизненных процессов в растениях, животных, почве и т. п.

Повышения интенсивности прорастания семян можно добиться также, пропуская постоянный и переменный токи через влажные семена и облучая ультрафиолетовыми лучами и электрическим светом. Практическое применение некоторых видов предпосевной обработки семян может стать рентабельным, однако дозировки и рекомендации для отдельных видов воздействия на семена не найдены.

§ 7. Различное использование ионизирующих излучений

В ряде случаев в сельскохозяйственном производстве требуется не стимулирование, а некоторое угнетение жизненных процессов, например при хранении картофеля. Воздействие соответствующими дозами ионизирующих облучений предохраняет картофель от прорастания. Снижаются дыхание картофеля и потеря питательных веществ за время хранения. В Советском Союзе разработаны производственные установки для обработки картофеля таким образом. Установка может работать с использованием конвейера, на котором картофель проходит через туннель с мощным источником излучения, или же источник излучения устанавливается прямо в хранилище.

Эти излучения могут быть использованы для регулирования жизнедеятельности полезных микроорганизмов. Так, например, дрожжи после облучения вырабатывают значительно больше эргостерина — продукта, из которого получают витамин D и некоторые другие медицинские препараты. Большие дозы облучения могут вызвать наследственные изменения в микроорганизмах. Таким путем была получена промышленная культура грибка пенициллина, способная вырабатывать в сотни раз больше пенициллина, чем исходная культура, найденная в природе.

Гамма-лучи при определенных дозах убивают микроорганизмы и насекомых. Облучая продукты и угнетая таким образом микроорганизмы, которые вызывают их порчу, добиваются увеличения срока хранения продуктов. Облучение мяса позволяет уничтожать личинки паразитических червей (глистов) — трихин.

Лучевая пастеризация и стерилизация проводятся обычно под землей в специальных помещениях или на по-

верхности в помещениях с толстыми бетонными стенами, защищающими от излучений обслуживающий персонал. Для облучения используются радиоактивный кобальт-60 или цезий-137. Для предотвращения химических изменений, нарушения внешнего вида и вкуса рекомендуется продукты перед стерилизацией замораживать или вводить в них специальные защитные средства, например витамин С. Облучение с целью уничтожения насекомых можно проводить непосредственно в земле, в зерне, древесине. Если доза даже не смертельна, насекомые делаются бесплодными, а развитие личинок останавливается. Практические приемы по облучению еще недостаточно разработаны.

Гамма-лучи используются также для контроля за качеством ремонтных и сварочных работ. В этом случае заменяют рентгеновский аппарат источником гамма-лучей, деталь просвечивают и фотографируют.

При автоматизации ионизирующие излучения используются, например, для контролирования уровня жидкости, толщины изделия, влажности и плотности материалов, скорости газов, давления и т. д.

Для борьбы со статическим электричеством, которое является причиной пожаров на предприятиях (мельницах, деревообделочных и др.), используются альфа-лучи, излучаемые радиоактивным полонием-210. Эти лучи ионизируют воздух, делают его электропроводящим и препятствуют накоплению статических зарядов, могущих в дальнейшем привести к искрению и пожарам. Металлические пластинки со слоем радиоактивного полония-210 подвешивают у мест образования статического электричества. Альфа-лучи распространяются от источника излучения на 10—15 *см*, поэтому они будут безопасны для людей, если места их расположения выбрать правильно. Ионы смешиваются с воздухом и уносятся из помещения.

§ 8. Метод меченых атомов

Методом меченых атомов решены и решаются важнейшие задачи, связанные с жизнедеятельностью растений и животных организмов. Этот метод позволяет изучать механизм усвоения растениями удобрений при различных способах его внесения и различных почвенно-климатических условиях, изучать фотосинтез в растениях, вопросы

обмена веществ, усвоения кормов животными в зависимости от различных факторов и т. п. Принцип метода заключается в том, что к удобрениям или кормам подмешивают радиоактивный изотоп того элемента, влияние которого на организм исследуется (углерод, водород, кислород, сера, фосфор, кальций и др.). Радиоактивный изотоп усваивается организмом так же, как и стабильный изотоп данного элемента. Но движение его в организме можно проследить при помощи приборов — счетчиков радиоактивных частиц.

Если, например, хотят проследить скорость усвоения фосфора в зависимости от способа его внесения в почву в составе суперфосфата, то некоторое количество радиоактивного фосфора P_{32} смешивают с суперфосфатом. Полученную смесь вносят под растение. Затем при помощи счетчика радиоактивных частиц следят за временем появления радиоактивного излучения в различных частях растения.

Радиоактивный фосфор излучает бета-лучи. По времени его появления можно судить о скорости усвоения фосфора растением, а по интенсивности излучения — о количестве усвоенного фосфора.

К работе с мечеными атомами допускаются только лица, которые прошли специальный курс по работе с радиоактивными изотопами, знают правила безопасности при обращении с ними и имеют специальное разрешение на работу с изотопами. Лица, не имеющие этой подготовки, засвидетельствованной специальным удостоверением, к работе с изотопами не допускаются, ибо нарушение правил безопасности при работе с ними может повлечь за собой опасное заболевание лучевой болезнью.

Глава XXVII

Применение электрической энергии для получения тепла

§ 1. Перспективы использования электрической энергии для тепловых целей

Использование электрической энергии для тепловых целей постоянно расширяется. При решении вопроса о применении электронагревательных приборов необходимо

помнить, что они могут быть целесообразнее других нагревательных приборов, когда по технологии производства требуется точное поддержание температуры (в инкубаторах, в пастеризаторах, в хранилищах, и т. п.); когда электронагрев приводит к значительному росту производительности труда (нагрев воды на ферме, электросушилки и т. п.); когда имеется возможность использовать энергию в ночные часы, так как электростанции не нагружены промышленными предприятиями (аккумуляционный водонагрев), и т. д.

Электрический обогрев жилищ в сельской местности в ряде случаев может оказаться экономичнее обогрева дровами или углем. Это можно показать следующим расчетом.

Стоимость 1000 *кдж* или 1000 *ккал*, полученных от любого вида топлива,

$$Д_т = \frac{1000 C_т}{\theta \eta}, \qquad (234)$$

где $C_т$ — стоимость топлива в *руб/кг* (уголь, нефть) или в *руб/м*^{3} (дрова);

θ — удельная теплота сгорания топлива (для дров 5050 тыс. *кдж/м*^{3}, или 1202 тыс. *ккал/м*^{3}; для угля антрацита 27300 *кдж/кг*, или 6540 *ккал/кг*);

η — тепловой к. п. д. печи, равный 0,35 для угольной или дровяной.

Стоимость топлива складывается из себестоимости на месте добычи и расходов на транспортирование.

Для электроэнергии стоимость 1000 *ккал*

$$Д_э = \frac{1000 C_э}{100 \cdot 860 \eta_э} = \frac{C_э}{86 \eta_э}. \qquad (235)$$

Если тепло принято в килоджоулях, то 1000 *кдж* будут стоить

$$Д_э = \frac{1000 C_э}{1000 \cdot 3600 \eta_э} = \frac{C_э}{360 \eta_э}, \qquad (235,а)$$

где $C_э$ — стоимость электроэнергии (*коп/квт·ч*);

$\eta_э$ — к. п. д. прибора, при внутренней установке $\eta_э = 1$.

Таким образом, можно сравнить, что дешевле — уголь, дрова или электроэнергия.

Вторая часть расчетов — определение примерной мощности на обогрев и расхода электроэнергии в год.

Мощность на обогрев

$$P = ap\,(\tau_{вн} - \tau_{н})\ вт/м^3, \qquad (236)$$

где p — удельная тепловая характеристика; для одноквартирного дома $p=0{,}75$ *ккал/ч·м³·град*, или 0,87 *вт/м³·град*;

a — коэффициент, учитывающий местные климатические условия (главным образом ветры) и равный от 1,2 до 1,4;

$\tau_{вн}$ — температура внутри помещения принимается равной 18°;

$\tau_{н}$ — среднесуточная температура за самый холодный месяц года.

При подсчете потребной на электроотопление энергии за весь отопительный сезон можно пользоваться следующей формулой:

$$W = ap\,(\tau_{вн} - \tau_{ср.\ сез})\,T, \qquad (237)$$

где $\tau_{ср.сез}$ — средняя наружная температура за сезон;

T — продолжительность отопительного сезона *(ч)*.

Расчеты показывают, что если отпускная цена на дрова более 20 руб. за 1 *м³*, то отопление электричеством выгоднее даже при стоимости электроэнергии 4 коп/*квт·ч*. При стоимости тонны угля 50 руб. электроотопление будет целесообразнее при стоимости 1 *квт·ч* менее 2 коп.

Особенно выгодно электроотопление при удешевленном ночном тарифе и использовании печей с аккумулированием тепла в ночные часы. Это практикуется в ряде зарубежных стран.

§ 2. Электронагревательные приборы для бытовых целей

Уже в настоящее время использование электрических плит и плиток в ряде районов может обеспечить значительную экономию топлива.

При сравнении эффективности электроплиток с огневыми и газовыми плитами следует учитывать то обстоятельство, что к. п. д. огневых плит при использовании их только для приготовления пищи (а не для обогрева жилища) составляет 12—13%. Поэтому использование их может быть рационально только в холодное время года. Газовые плиты имеют к. п. д. от 20 до 40%, керосинки — около 30%, электрические плиты — от 40% и более. Одинаковая стоимость приготовления пищи на газе (при

газификации) и электроэнергии будет при стоимости электроэнергии до 1,65 коп/*квт·ч*. При введении двойного тарифа на электроэнергию (стоимость электроэнергии, потребленной в ночные часы, в 2 раза меньше, чем в дневное время) становится целесообразным применение аккумулирующих электроводонагревателей.

С расширением применения электрических нагревательных приборов растет годовое потребление электроэнергии на душу населения. В 1970 г. на одного сельского жителя нашей страны будет приходиться 300—320 *квт·ч*. При этой норме исключено широкое внедрение электроотопления. Но даже при газификации и при существующем тарифе на электроэнергию выгодно использовать электроутюги, кофейники, блинницы и другие электронагревательные приборы. Ниже приводятся сведения по некоторым бытовым нагревательным приборам: указана их мощность и примерное потребление электроэнергии в год семьей в 4—5 человек.

1.	Электроплита напольная на две конфорки с жарочным шкафом—3,8 *квт*; 600 *квт·ч* в год		
2.	Электроплита настольная на две конфорки	2,4 *квт*	1500 *квт·ч*
3.	Жарочный шкаф	1,6 *квт*	225 *квт·ч*
4.	Электрочайник	1,0 *квт*	175 *квт·ч*
5.	Электросамовар	1,0 *квт*	200 *квт·ч*
6.	Нагреватель воды погружного типа	1,0 *квт*	250 *квт·ч*
7.	Нагреватель воды быстродействующий	2,0 *квт*	500 *квт·ч*
8.	Водонагреватель аккумулирующий, 45 *л*	0,7 *квт*	1500 *квт·ч*
9.	Электроутюг с регулированием температуры	1,0 *квт*	100 *квт·ч*
10.	Рефлекторные отопительные печи	0,5—1,0 *квт*	75 *квт·ч*
11.	Радиационные печи (панели)	1,0 *квт*	300 *квт·ч*
12.	Электроотопительные печи с аккумулированием	2—3 *квт*	2000—3000 *квт·ч*

Находят широкое применение электрические медицинские грелки.

В ряде зарубежных стран получают широкое распространение электроодеяла *. В одеяле устанавливается нагревательный элемент с термоэлектрорегулятором. Имеется диск для регулирования температуры нагрева.

Существуют следующие способы обогрева жилищ и производственных помещений.

1. Трубчатыми нагревателями, устанавливаемыми в помещении по плинтусу.

* Опытная партия выпущена и в СССР.

2. Различными по форме и размерам теплоизлучающими панелями из стекла или металла. Эти панели устанавливают в окнах или на стенах.

3. Калориферами, состоящими из электронагревателей и вентиляторов, устанавливаемых в системе централизованного вентилирования или в вентиляционных вводах в каждой комнате.

4. Нагревательным проводом или кабелем, укладываемым в канавках бетонного пола.

5. Легкими нагревательными листами — типа фольги, наклеиваемыми на потолок.

6. Теплоаккумулирующими печами, внутренний слой которых нагревается ночью за счет дешевой электроэнергии (при двойном тарифе). Нагревательный слой окружен теплоизолирующим слоем. Запасенное тепло поступает в помещение под действием вентилятора через воздушные каналы.

7. Аккумуляционным нагревом в теплоизолированных электродных котлах воды, которая циркулирует в системе центрального отопления.

8. Электроэнергетическими установками или тепловыми насосами, принцип действия которых изложен ниже.

По зарубежным данным, если принять стоимость обогрева городским газом за 100%, прямое электроотопление того же помещения будет стоить 145%; отопление на нефти — 42%; угольное отопление — 55%; отопление тепловым насосом — 42%.

§ 3. Применение электротепла в производственных процессах

В настоящее время электрический нагрев можно экономически эффективно применять более чем в 50 производственных процессах. Вот далеко неполный перечень этих процессов.

Молочное животноводство и свиноводство: нагрев воды в моечных и кормокухнях, на доильных площадках, в системах автопоения, в групповых поилках (при беспривязном и бесстаночном содержании животных), в душевых камерах и бассейнах для мытья животных; электропаровая стерилизация молочной посуды и частей доильной машины; запаривание сочных кормов; запаривание картофеля на силос; подготовка концентрированных кормов; электро-

силосование грубых кормов; выпечка кормового хлеба; сквашивание молока на ацидофилин; искусственная выпойка поросят и ягнят; пастеризация молока, сливок и обрата; местный обогрев пола в репродуктивных свинарниках; обогрев акклиматизационных площадок для поросят-отъемышей; местный обогрев пола на скотных дворах с высокоудойными коровами; вентиляция с подогревом свежего воздуха в репродуктивных свинарниках в телятниках; обсушка новорожденных животных.

Птицеводство: инкубация, отопление и вентиляция цыплятников, утятников, индюшатников, обогрев птичников; подогрев воды в поилках.

Шелководство: кондиционирование воздуха в червоводнях; нагрев коконов.

Пчеловодство: выводка детки; обогрев ульев; распечатка сотов; впаивание вощины.

Растениеводство открытого грунта: яровизация картофеля; тепловое протравливание семян; сушка зерна и семян на селекционных станциях; сушка плодов, овощей, грибов, хмеля, хлопка; активное вентилирование сена с подогревом воздуха; ферментация чая и табака.

Растениеводство закрытого грунта: обогрев зимних и весенних парников для выращивания рассады, овощей, хлопка, табака, сеянцев цветов, черенков садовых культур; обогрев теплиц; обогрев помещений для культуры шампиньонов; обогрев ящиков для стратификации виноградных прививок; дозревание помидоров; стерилизация почвы и рассадо-посадочного материала.

Сельскохозяйственные мастерские: горячая промывка тракторных деталей; регенерация масел; вулканизация авторезины; плавка баббита; наплавка деталей; сварка и т. д.

Кроме чисто электрического нагрева, в сельском хозяйстве перспективно применение комбинированного нагрева. При этом основная доля тепла получается от систем с угольным, газовым или на жидком топливе обогревом, а дополнительный нагрев в целях повышения эффективности процесса или установки осуществляется от электроустановок.

Когда обогрев краткосрочный, а также когда требуется точное поддержание температуры, электронагрев — вне конкуренции. Лишь при необходимости длительного постоянного обогрева с большим выделением тепла экономи-

чески целесообразно применять централизованную теплофикацию.

Производительность труда при применении электронагревательных установок промышленного назначения выше, чем при пламенном нагреве.

Удобство эксплуатации, широкая возможность автоматизации и возможность применения нагрева в комплексе автоматизированных процессов дают основание рассчитывать в перспективе на значительный рост использования электричества для удовлетворения потребности сельскохозяйственного производства в тепловой энергии.

При определении границ целесообразного использования электроэнергии для получения горячей воды и пара в животноводстве можно пользоваться следующим соотношением:

$$C_{эн} \leqslant \frac{864 C_т \eta_{эн} K_р}{\theta_н \eta_{тн}}, \qquad (238)$$

где $C_{эн}$ — стоимость 1 *квт·ч* электрической энергии (коп.);

$C_т$ — стоимость 1 *кг* топлива (коп.);

$\eta_{эн}$ — к. п. д. электронагревателя, принимается равным 0,9—0,98;

$\eta_{тн}$ — к.п.д. огневого прибора для котлов парообразователя, равен 0,35—0,55;

$K_р$ — коэффициент, учитывающий добавочные затраты на рабочую силу, обслуживающую огневые установки для котлов-парообразователей, принимается равным 1,25—1,5;

$\theta_н$ — удельная теплота сгорания топлива (*ккал/кг*).

§ 4. Электрообогрев в защищенном грунте

При решении вопроса об эффективности применения электронагрева в защищенном грунте необходимо учитывать назначение того или иного сооружения защищенного грунта, его конструкцию, срок эксплуатации, вид выращиваемой культуры.

В остекленных зимних теплицах можно выращивать рассаду овощных культур, плодоносящие огурцы или томаты, лук на перо, салаты и т. д. В настоящее время, как правило, электрообогрев зимних теплиц экономически нецелесообразен. Но эффективен местный подогрев почвы,

например, под рассадой при высокой плотности посадки растений, при выгонке лука на перо, салата-витлуфа на зелень и т. д. В ряде случаев бывает целесообразен дополнительный электрообогрев к системе водяного централизованного обогрева, автоматически включаемый при снижении температуры внутри теплиц ниже критической.

В весенних теплицах, укрытых стеклом или пленкой и обогреваемых за счет солнечной радиации, для сохранения растений при ночных резких снижениях температур целесообразно устраивать систему аварийного электроподогрева. Ее использование позволит также начать эксплуатацию весенних теплиц на 10—14 дней раньше. При этом система должна быть автоматизированной, поддерживающей температуру только на минимально необходимом уровне без затраты энергии на малоэффективный избыточный нагрев.

В ранневесенних парниках под остекленными рамами можно устроить электрообогрев почвы и воздуха, если есть избыточная дешевая электроэнергия. В этом случае надо провести технико-экономическое сравнение возможных вариантов обогрева и принять более дешевый.

В поздневесенних солнечных парниках под пленкой, обогреваемых за счет солнечной радиации, целесообразно применять систему дополнительного автоматизированного обогрева воздуха для предупреждения гибельных последствий заморозков.

Для выгонки салатного цикория витлуфа, не нуждающегося в освещении, целесообразно применять грядки с автоматизированным электронагревом, устраиваемые непосредственно в хранилищах.

В районах с продолжительной и холодной зимой, а также на крайнем севере целесообразно выращивать растения в подземных хорошо теплоизолированных помещениях с использованием искусственного освещения люминесцентными лампами и лампами типа ДРЛ, которые и обогревают помещения в достаточной мере.

Мощность, потребная на обогрев,

$$P = KF(\tau_в - \tau_н), \qquad (239)$$

где P — мощность *(вт)*;

F — площадь поверхности укрытия, через которую сооружение теряет тепло *(м²)*;

$\tau_в$ — необходимая внутренняя температура для расте-

ний; при защите от заморозков холодостойких культур (редис, салат) может быть принята равной $+4°$, а для теплолюбивых (огурцы, помидоры) $+12°$;

$\tau_н$ — возможная минимальная наружная температура в период выращивания растений может быть принята равной среднемесячной минимальной за последние 5—10 лет для данного района;

K — коэффициент теплопередачи *(вт/м²·град)*.

Для остекленных теплиц и парников $K=6$ *вт/м²·град*; для парника под остекленными рамами и соломенными матами $K=3$ *вт/м²·град*; для остекленных парников с покрывалом из плотной бумаги $K=4$ *вт/м²·град*; при использовании поролоновых покрывал $K=2{,}1$ *вт/м²·град*; для укрытий из пленки $K=10\div13$ *вт/м²·град*; для солнечных парников с укрытием из пленки с дополнительным покрывалом из плотной бумаги $K=5{,}5$ *вт/м²·град*; для подвалов и подземных хорошо утепленных сверху помещений $K=1{,}5\div2{,}0$ *вт/м²·град*.

Пример. Определить примерную мощность системы ночного воздушного аварийного обогрева для солнечного парника под пленкой ($K=10$) с площадью укрытия $F=30$ *м²* при выращивании цветной капусты ($\tau_в$ минимальная — $+4°$ С); ожидаемая минимальная почная температура в апреле $\tau_н=-6°$ С.

$$P=KF(\tau_в-\tau_н)=10\cdot30\,[4-(-6)]=10\cdot30\,(4+6)=3000\ вт=3\ квт.$$

Пока еще нет стандартизованных обогревающих комплектов для тех или иных случаев обогрева сооружений защищенного грунта.

Наиболее перспективный для обогрева почвы в парниках метод обогрева асфальто-цементными блоками, разработанный в Научно-исследовательском институте механизации и электрификации Северо-Запада (г. Пушкин). На изготовление блоков идет битум нефтяной БН-5 (12%), цементный порошок (10%), песок (78%). Размеры блоков $0{,}5\times0{,}5\times0{,}06$ *м*. Внутри блока змейкой уложен стальной оцинкованный провод диаметром 3,5—4 *мм*. Два конца его выходят по диагонали блока. В котлован парника насыпают сначала шлак, затем песок — 5 *см*, затем укладывают блоки двумя рядами (60 штук для 20-рамного парника). Концы нагревательного провода спаивают твердым припоем и изолируют массой асфальтобетона. Мощность на парник 5 *квт*. Сверху блоков насы-

пают грунт 18—20 *см*. Питание от сети 220/380 *в*. Блоки имеют чрезвычайно надежную изоляцию, обеспечивается полная безопасность обслуживающего персонала. Изоляция блоков самовосстанавливается, так как масса расплавляется и заполняет образовавшиеся при этом трещины.

Широкое распространение получил также способ обогрева парников, разработанный Запорожским филиалом Всесоюзного научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. Нагревательным элементом является стальной оцинкованный провод, заключаемый в асбоцементные трубы диаметром 125/145 *мм*, 180/199 *мм* или в гончарные глазурованные трубы диаметром 125/143 *мм* и более. Стыки между трубами цементируют или соединяют цементными муфтами. Трубы в почве укладывают двумя параллелями на глубине 300 *мм*. Провод включают на напряжение сети 220/380 *в*.

Для обогрева воздуха в солнечных парниках и весенних теплицах можно применять нагревательный провод типа ПОСХВ (провод одножильный сельскохозяйственный в полихлорвиниловой изоляции), а также электрокалориферы.

Автоматизированные системы обогрева дают значительную экономию электроэнергии по сравнению с неавтоматизированными. Уменьшение расхода электроэнергии при автоматизации может быть в 4—5 раз. На рисунке 286 показано, как меняется естественная температура в последних числах марта, в начале апреля под пленочными укрытиями солнечных парников в ясный и облачный день.

В дневные часы за счет солнечной радиации под пленкой обеспечивается температура, благоприятная для развития холодостойких культур. Однако ночью, особенно безоблачной, запасенное днем тепло уходит из парника, и температура падает (в первый день в точке B до $-8°$). Чтобы удержать температуру на уровне $+4°$, можно воспользоваться автоматизированной или неавтоматизированной системами обогрева. При автоматизированной системе температура будет изменяться в виде ломаной линии *2*, верхние точки которой соответствуют моментам отключения системы, а нижние — моментам включения. Расход энергии будет пропорционален площади ABC, заштрихованной с наклоном линий вправо. Если же система не автоматизирована (линия *3*) и включается вручную при снижении температуры до $+4°$, расход энергии возрастет более чем вдвое.

При облачной погоде ночное снижение температуры несколько меньше. Расход энергии при неавтоматизированной системе будет в 3 раза больше, чем при автоматизированной. Наконец, при автоматике не надо держать специального наблюдателя, который включает и выключает неавтоматизированную систему.

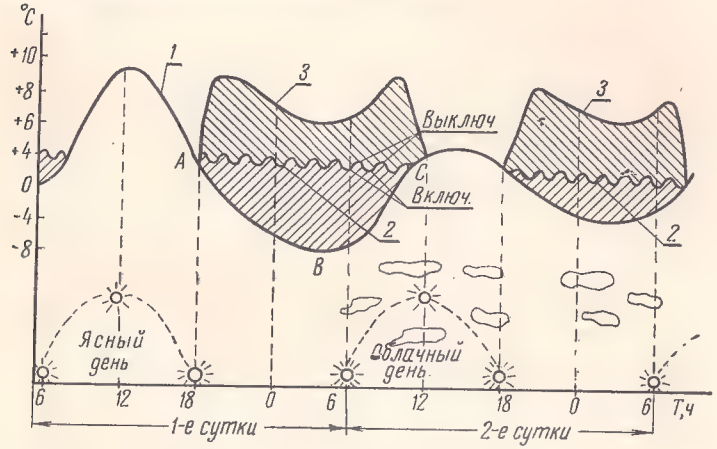


Рис. 286. Примерное изменение температуры воздуха под пленочным укрытием солнечных парников:

1 — ход естественной температуры в парнике; *2*— ход температуры при автоматическом включении и выключении системы дополнительного подогрева воздуха; *3*— ход температуры под пленкой при постоянном включении системы обогрева (неавтоматизированная система).

Из других применений электротепла в овощеводстве защищенного грунта следует отметить стерилизацию почвы, главным образом в небольших количествах под рассаду. Расход энергии на нагрев почвы до 95—98° составляет 45—50 *квт·ч/м*³. Стерилизаторы могут быть электродного типа, когда ящик, в котором нагревается почва, перегорожен пластинами-электродами, равноотстоящими друг от друга, и к ним подводится напряжение. Нагрев идет за счет прохождения тока непосредственно в почве. В элементных стерилизаторах нагрев почвы идет от труб с вложенными в них проволочными нагревателями. Трубы с нагревателями располагают в шахматном порядке вдоль ящика-стерилизатора с расстоянием между ними 20—25 *см*.

Для стерилизации рассады овощей, а также посадочного материала плодово-ягодных культур большой эффект дают ванны-стерилизаторы, вода в которых нагревается автоматизированным нагревателем. Это позволяет установить строго заданную температуру (например, точно 46° для черенков смородины, рассады садовой земляники и т. д.) и погружать на некоторое время в воду стерилизуемый материал.

В настоящее время разрабатываются различного рода установки для внедрения электротепла в овощеводстве и садоводстве не только в описанные выше процессы, но и для сушки, а также в процессы хранения и т. д.

§ 5. Получение тепла при помощи тепловых насосов. Кондиционеры

Принцип действия теплового насоса аналогичен принципу действия компрессионного холодильника. В тепловом насосе в отличие от холодильника тепло от источника с низкой температурой переносится к источнику тепла с более высокой температурой. В холодильнике же тепло, отнятое от воздуха в камере хранения и находящихся там продуктов, передается в окружающий воздух помещения — через радиатор, установленный сзади холодильника, обычно теплый на ощупь. На рисунке 287 представлена схема отопления жилых домов *5* за счет тепла, отнимаемого от низкопотенциального источника (река, термальные подземные воды, тепловые отходы промышленного производства). Тепло переносится рабочей жидкостью (агентом) с низкой температурой кипения (фреон, аммиак и др.), циркулирующей в замкнутой системе теплового насоса. Это происходит следующим образом. Компрессор *1* создает разрежение в испарителе *2*, благодаря чему жидкость-агент кипит при $\tau = -2°$. Процесс кипения форсируется подачей в змеевик подогрева воды от низкопотенциального источника тепла (на рисунке подледной воды при $t = +4°$). Эта вода, охлаждаясь, передает свое тепло жидкости-агенту. Пары агента компрессор нагнетает в конденсатор *3*, где за счет высокого давления температура паров агента поднимается (на рисунке до $+75°$). В змеевике конденсатора циркулирует вода из системы отопления домов. Пары агента охлаждаются и конденсируются, а вода в системе обогрева подогревается (на рисунке входит

$t=+55°$ и выходит с $t=+70°$). Сконденсировавшийся агент через дроссельный вентиль *4* снова поступает в испаритель 2 и т. д.

Электроэнергия затрачивается здесь лишь на привод компрессора и насосов. По сравнению с прямым электро-

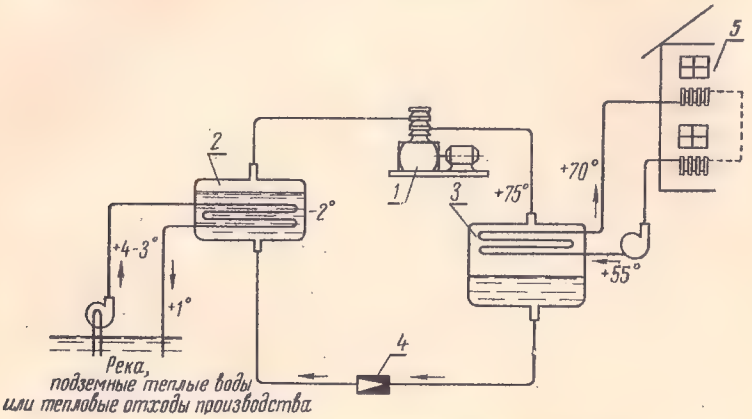


Рис. 287. Схема отопления жилых домов при помощи теплового насоса:

1 — компрессор; *2*— испаритель; *3*— конденсатор; *4*— дроссельный вентиль; *5*— отапливаемые дома.

нагревом расход электроэнергии будет меньше в 2,5—3 раза, в зависимости от температурных условий и качества применяемых материалов.

В настоящее время тепловые насосы применяют для отопления ряда объектов в Крыму, Ленинграде, Волгограде, Ташкенте, Владивостоке и других городах.

Перспективно применение тепловых насосов при экономической целесообразности децентрализованного теплоснабжения, то есть в районах с малой тепловой нагрузкой при дорогом топливе. Особенно целесообразно применять тепловые насосы там, где надо иметь и тепло и холод, или там, где зимой требуется отопление помещения, а летом — его охлаждение. В сельском хозяйстве одним из наиболее перспективных мест применения тепловых насосов является животноводство. За рубежом уже находят применение тепловые насосы для охлаждения молока и одновременного нагрева воды в системе центрального отопления служеб-

ных помещений. Так, при суточном надое 11 *т* молока количество отнимаемого от него тепла составляет около 400 000 *ккал*, что достаточно для нагрева 6 тыс. *л* воды на 50°. В установках меньшего размера при охлаждении 450 *л* молока с 32 до 4,5° отнимается энергия, эквивалентная 24 *квт·ч*. Эта энергия нагревает воду для мойки оборудования, подмывания вымени и других целей.

Перспективно применение кондиционеров воздуха для охлаждения воздуха в помещениях летом и нагрева его зимой. Комнатные кондиционеры устанавливают обычно в вырезе на окно *8* (рис. 288). Компрессор кондиционера *1* приводится в действие электродвигателем *5*. От него же приводятся в действие вентиляторы *4* и *6*. Вентилятор *4* засасывает воздух из комнаты и прогоняет его через пластины радиатора-испарителя *2* снова в комнату. Благодаря этому в жаркое летнее время воздух в комнате охлаждается. Агент в конденсаторе *3* охлаждается наружным

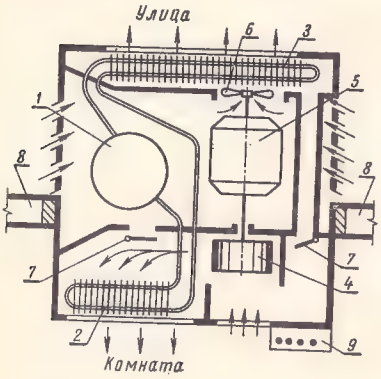


Рис. 288. Схема кондиционера воздуха для отдельных комнат:

1 — компрессор; *2* — радиатор испарителя; *3* — радиатор конденсатора; *4* и *6* — вентиляторы; *5* — двигатель; *7* — заслонки; *8* — окно комнаты; *9* — панель управления.

воздухом. В случае необходимости может работать один вентилятор и через заслонки *7* вентилировать помещение. С помощью панели управления *9* можно задать тот или иной режим работы кондиционера: летом — на охлаждение воздуха в помещении, зимой — на подогрев.

Пока стоимость установок с тепловыми насосами еще высока так как нет их массового серийного изготовления. Однако они, несомненно, найдут большое распространение в сельском хозяйстве как для бытовых, так и производственных целей.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аварийные перегрузки трансформаторов 169
Автоматические выключатели 276
Автоматическое гашение поля 316
— повторное включение 296
— регулирование возбуждения 338, 342
Автотрансформатор 164, 180
Аккумуляторы 43—50
Активное сопротивление 24, 89
Анионы 25
Анод 25
Ампер 10, 12, 24
Ампер-витки 59
Амперметр 143—145
— схемы включения 143
— устройство 145
Амплитуда электрической величины 84
Аппаратура управления электроустановками 273—299
Ареометр 46
Арматура осветительная 506
— для внутренних проводок 406
Асинхронная муфта скольжения 231
Асинхронный генератор 201, 229
Астатические приборы 148
Атомные батареи 56

Бактерицидные лампы 542
Батареи гальванических элементов анодные 43
— — — накальные 43
Биффилярная намотка 80
Блокировка 284, 365
Бытовой автомат 280, 323

Ватт 11, 37
Вектор 23, 85, 127—129
Векторная диаграмма 23, 85, 127—129
Ветроэлектростанция 268
Взаимоэкранирование заземлителей 350
Вихревые токи 81
Внешнее и внутреннее сопротивления 22
Возбудитель 234, 261
Возбуждение от механических выпрямителей 236
— от твердых выпрямителей 235
Воздушные автоматические выключатели низковольтные 276—280
Воздушный конденсатор 16
Вольт 14, 24
Вольтметр, устройство 145
схемы включения 143
Вращающий момент электродвигателя 218
Выключатели автоматические высоковольтные 292—299
— автогазовые 296
— воздушные 295
— масляные и безмасляные 290, 292—294
— нагрузки 290
Выпрямитель газотронный 255
— пробивное напряжение 250
— ртутные 255
Выпрямление переменного тока 247
Высоковольтные предохранители 325

Газы 8
Галетные батареи 42
Гальванические элементы 40
Гальванотехника 25
Генератор 123

— автомобильный 194
— асинхронный 229
— постоянного тока 189
— синхронный 124, 233
Германий 54, 249
Гистерезис 64
Гистерезисный двигатель 246
Графики нагрузки 269—272
Гремучий газ 35, 48
Гроза 435
Грозовой разряд 19, 435
Грозозащита 441
Гром 19, 436
Грунт, удельное сопротивление 352
Группы соединений обмоток трансформаторов 177

Датчик импульсов для электроизгороди 78
Датчики в схемах автоматического управления 486—493
Двигатель асинхронный 201
— коллекторный 186, 199
— конденсаторный 222
— многоскоростной 227
— однофазный 221
— синхронный 233
— стартерный 198, 245
— с фазным ротором 213
Двигатель-генератор 247
Действующее значение синусоидального тока и напряжения 87
Джоуль 11
Диамагнетики 61
Диссоциация молекул 7
Диэлектрики 77
Диэлектрическая проницаемость 13
Длительные перегрузки трансформаторов 169
Дугогасительные камеры 274, 279, 291

Единая серия электродвигателей 204
Единицы измерения электрических величин 8
Естественный магнит 56

Жидкостный реостат 35
Железо-никелевые аккумуляторы 44

Заземление 128, 133, 345
— сопротивление растеканию 347
Заземлители 346
— естественные и повторные 335, 358
Заземляющий контур 349
Закон Ома 22, 66, 101, 108
Замыкание на землю 300
Заряд аккумулятора 44, 46—50
Защитное отключение 362
Защитные средства индивидуальные 363
Зуммер 77

Измерительные приборы 137
— обозначения на шкалах 138
— трансформаторы тока 152, 155
— трансформаторы напряжения 154, 158
Изоляторы 381
Изоляция, классы 464
Индуктивное сопротивление 96
Индуктивность катушки 76, 79
Индуктор 187, 232
Индукционная плавка металлов 82
Индукционный аппарат 77
Ионизация газа 8
Ионный электрический ток 7
Ионы 7, 25
Искрогасительные камеры 279
Искусственное дыхание 368
Источник энергии 21
Истребитель насекомых высоковольтный 531

Кабели 382, 385
Кабельные муфты 433
Кадмий-никелевые аккумуляторы 44
Катионы 25
Катод 25
Киловатт 37
Килограмм-метр 9, 37
Кирхгофа первое правило 27
— второе правило 29
Кислотные аккумуляторы 45
Климатические районы 375
Коллектор 186
Командо-контроллер 288
Компаундирование возбуждения 342

Компенсация реактивной мощности 121, 246
Комплектные распределительные
устройства 330
— станция управления 288
— трансформаторные подстанции 332—336
Конденсаторы 14, 121
Контакторы 280
Контактный термометр 490
Контакты размыкающие 304, 478
— замыкающие 304, 478

Короткое замыкание 23, 173, 300
Коэрцитивная сила 64
Коэффициент выпрямления 250
— загрузки 176
— заполнения графика 169, 280
— мощности 104, 112, 120, 147, 216
— полезного действия 40, 176, 215
— прикосновения 349
— трансформации 152, 164, 173
Кулон 11
Кулона закон 12, 57

Лампы дуговые ртутные люминесцентные 518
— кварцевые 539
— ксеноновые 519
— люминесцентные 510
— накаливания 500
— основные параметры 502
Логометры 159
Лошадиная сила 38
Люксметр 54
Люминесцентный анализ 548

Магазины сопротивления 35
Магнето 244
Магнетодиэлектрики 65, 81
Магнитная индукция 59
— проницаемость 59
— цепь 66
Магнитное насыщение 63
— поле 57, 123
Магнитные пускатели 282
— свойства материалов 60
— станции управления 288
Магнитный поток 63
— тормоз 81
Магнитомягкие материалы 65
Магнитотвердые материалы 65
Масляные выключатели 290, 292
Машины электрические асинхронные 201
— переменного тока 201
— постоянного тока 186
— синхронные 233
Меднение 26
Медные провода 381
Металлы 7
Механическая прочность провода 402
Механические характеристики электропривода 461
Молекула 6
Молниеотвод 20, 443
Молния 19, 435
Монтаж проводок 406—422
Мощность в цепи постоянного тока 37
— активная 90, 103, 112
— мгновенная 90
— полная 102, 112
— рассеивания 36
— реактивная 98, 103, 110
— трехфазного тока 133
Муфты кабельные 433

Нагрев двигателей 463
— проводов 31, 388
Нагрузка генератора 129, 239
— двигателя 465
Нагрузочная вилка 50
Намагниченность среды 62
Напряжение источника 22
— линейное 129
— номинальное 170
— определение 14, 22
— прикосновения 346, 349
— стандартное 130
— фазное 129
— шаговое 347
Напряженность магнитного поля 59
— электрического поля 14
Нейтраль 128
Нейтрон 6
Непроволочные реостаты 34
— сопротивления 33, 36
Низковольтные предохранители 320—325
Нулевая защита 284
Нулевой провод 128

Однофазный трансформатор 167
— асинхронный электродвигатель 221
— преобразователь 247
Оконцевание проводов 417
Оксидирование 26
Ом 22
Омическое сопротивление 92
Опоры и их типовые конструкции 377
Освещение, виды и системы 522
— в птичниках 532
— в теплицах 533
Освещенность 498
Остаточный магнетизм 63
Остеклованное сопротивление 36
Осциллографы 162
Отделители 298
Отклонение напряжения 389
Относительная диэлектрическая проницаемость 13
— магнитная проницаемость 60

Падение напряжения 390
Пакетные выключатели 275
Параллельная работа генераторов 238
— — трансформаторов 179
Параллельное соединение 26
Парамагнетики 61
Паспорт электродвигателя 203
Передаточные механизмы 467
Переключатели 273
Перемагничивание 64
Переменный ток однофазный 82
— — трехфазный 123
Перенапряжения атмосферные 437
Период колебания 86
Плавкие вставки предохранителей, шкала 321
— — — выбор по условиям нагрева 388
Поверхностный эффект 92
Подстанции потребительские столбовые 332
— комплектные 333
Ползунковый реостат 33
Полупроводники 7, 249
Полюса магнита 57
Поляризация 7
Помощь пострадавшему от тока 366—369
Последовательное соединение 26
Постоянный ток 21
Потенциал поля 14
— земли 14
— по отношению к земле 20
Потенциометр 34
Потеря напряжения 390
Правило левой руки 70
— правой руки 72
— Ленца 74
Предохранители 320—326
Преобразователь частоты асинхронный 231
Приводы к разъединителям 291
— к выключателям нагрузки 292
— к автоматическим выключателям 296
Приемник энергии 21
Приставки железобетонные 378
Провода для внутренних проводок 382
— для воздушных сетей 381
Пробивное напряжение 19, 250
Пробой диэлектрика 19
Проводимость 7, 28, 116
Проводники второго рода 7
— первого рода 7
Проволочное сопротивление 36
Прожектор 509
Пульсирующий ток 82, 186
Пускатели нажимные 274
Пусковые реостаты 34, 191, 213, 286
Пьезоэлектричество 72
Пусковая обмотка 222

Радиоактивное излучение 555
Разность потенциалов 14
Разрядники 455
Разъединители 290
Распределительные устройства 262
Расчет сопротивлений 29
Реверсивные контакторы 281
Реактивный ток 97, 115
— двигатель 246
Регулятор вибрационный 194
Регуляторы напряжения 194, 340
Резонанс напряжений 113
— токов 19
Режимы работы электродвигателя 465
Реле 303—316
Релейная защита токовая 301, 303

— — генераторов 314—318
— — двигателей 320
— — трансформаторов 319
Реостаты 33, 191
Ротор 123, 203
Рубильники 273

Самовозбуждение 189, 230, 236
Самоиндукция 75, 192
Самопишущие приборы 162
Самосинхронизация 242
Светильники 506—509
Световой поток 496
Светоотдача 499, 503
Свинцовые аккумуляторы 44
Себестоимость энергии 272
Секционирование 297
Селен 54, 249
Серебряно-цинковые аккумуляторы 44
Синхронизация 238
Синхроноскоп 239
Синхронный генератор 233
— двигатель 233, 245
— компенсатор 121, 246
Соединение проводов 414
Соединение фаз звездой и треугольником 128, 131, 207
Солнечные батареи 54
Сопротивление активное 24, 89
— емкостное 108
— изоляции 161
— индуктивное 96
— полное 100
— постоянной величины 36
— реактивное 96, 108
— растеканию тока 347
— тела человека 335
Спектр света 495
Среднее значение синусоидального тока 87
Средства индивидуальной защиты 363
Статический заряд 12
Статическое электричество 20
Статор 123, 203
Ступенчатый реостат 34
Схемы электрических соединений 261
— монтажные 263, 475
— однолинейные 262
— принципиальные 263, 475
— трехлинейные 262
Сульфатация 48

Счетчик электрической энергии 149

Температурный коэффициент сопротивления 32
Тепловое действие тока 39
— реле 285
Тепловой эквивалент джоуля 39
Теплоэлектростанция 263
Теплоэлектроцентраль 265
Термисторы 33
Термопара 51
Термосопротивление 32
Термоэлектрогенераторы 51
Топливные элементы 50
Травление 25
Трансформаторные подстанции комплектные 334
— — потребительские 332
Трансформаторы двухобмоточные 164
— измерительные 155
— напряжения 154, 158
— однофазные 164, 167
— повышающие и понижающие 164
— тока 152, 155
— трехфазные 164
— силовые 164
— специальные 164
Трибоэлектричество 71
Трубчатые разрядники 456

Удельная проводимость 29
Удельное сопротивление металлов и сплавов 29
Ультрафиолетовые лучи 496, 537
Умформер 248

Фаза синусоидального тока 84
Фазировка трансформатора 179
Фазометры 104, 160
Фарада 15
Ферриты 65
Ферромагнетики 61
Форсировка напряжения возбуждением 343
Фотоэлементы 54
Фуко токи 81

Характеристика электродвигателя 461
Химический элемент 40

Химическое электричество 40
Хромирование 26

Центр тяжести нагрузки 373

Частота переменного тока 85, 125

Штыревые изоляторы 380

Щелочные аккумуляторы 49
Щетки коллекторные 82, 138
Щиты управления 289

Электризация 12, 20, 71
Электрическая мощность 37
— прочность 19
— система 258
— цепь 21
— энергия 31
Электрические величины и единицы их измерения 136
— сети 259, 371
Электрический ток проводимости 6
Электрическое поле 14
Электричество 5
Электрод 25
Электродвижущая сила 22, 72, 83
Электроизгородь 77
Электрокультура 553
Электролиз 25
Электролит 7, 25, 46
Электромагнетизм, 56, 69
Электромагниты 68
Электромагнитная муфта 69, 232
— индукция 72
Электрон 6
Электронагрев в сельском хозяйстве 557
Электропривод 459—462
Электрорафинирование 25
Электросварка 182—185
Электростанция автоматическая 266
— атомная 266
— гидравлическая 267
— дизельная 266
— тепловая 263
Электростатическое поле 14
Электротехническая сталь 65
Электрохимическое обезжиривание 26
Электроэнергии учет коммерческий 149
— — технический 149
Энергия, виды 5
Энергосистема 258

Якорь 187
Ящики пусковые 288

Оглавление

Введение 3

Раздел первый

Практическая электротехника

Глава I. Основы электричества. Электрические заряды. Электрическое поле 5

§ 1. Природа электричества. Электрические свойства веществ 5
§ 2. Системы единиц измерений электрических, магнитных и механических величин 8
§ 3. Статический заряд тела и электрическое поле . . . 12
§ 4. Конденсаторы 14
§ 5. Разряд конденсатора. Электрическая прочность диэлектрика 18
§ 6. Статическое электричество 20

Глава II. Постоянный ток 21

§ 1. Электрическая цепь постоянного тока. Закон Ома 21
§ 2. Постоянный ток в электролитах. Электролиз. Гальванотехника 25
§ 3. Параллельное и последовательное соединение сопротивлений 26
§ 4. Расчет сопротивлений 29
§ 5. Влияние нагрева на величину сопротивления . . . 31
§ 6. Реостаты и магазины сопротивлений 33
§ 7. Сопротивления постоянной величины 35
§ 8. Мощность в цепи постоянного тока, электрическая энергия и коэффициент полезного действия 37

Глава III. Источники постоянного тока 40

§ 1. Гальванические элементы 40
§ 2. Аккумуляторы — вторичные химические элементы 43
§ 3. Эксплуатация аккумуляторов 45

§ 4. Топливные элементы 50
§ 5. Термоэлектрогенераторы 51
§ 6. Фотоэлементы и «солнечные батареи» 54

Глава IV. Электромагнетизм 56

§ 1. Естественный магнит и магнитное поле 56
§ 2. Магнитное поле проводника с током 58
§ 3. Напряженность магнитного поля и магнитная индукция 59
§ 4. Магнитные свойства материалов 60
§ 5. Магнитный поток 63
§ 6. Остаточный магнетизм. Потери на перемагничивание 63
§ 7. Магнитные материалы 65
§ 8. Закон Ома для магнитной цепи и ее расчет . . . 66
§ 9. Электромагниты и их применение 68
§ 10. Проводник с током в магнитном поле 69

Глава V. Превращение механической энергии в электрическую. Электромагнитная индукция. 71

§ 1. Генераторы трибоэлектричества. Пьезоэлектричество 71
§ 2. Электромагнитная индукция 72
§ 3. Самоиндукция. Индукционная аппаратура 75
§ 4. Индуктивности катушек. Соединение индуктивностей 79
§ 5. Вихревые токи 81

Глава VI. Однофазный переменный ток 82

§ 1. Получение переменного тока 82
§ 2. Частота колебаний переменного тока 85
§ 3. Действующее значение переменного синусоидального тока 87
§ 4. Цепь переменного тока с активным сопротивлением 89
§ 5. Цепь переменного тока с индуктивностью 92
§ 6. Цепь переменного тока с активным сопротивлением и индуктивностью 98
§ 7. Цепь переменного тока с емкостью 105
§ 8. Цепь переменного тока с активным сопротивлением и емкостью 110
§ 9. Цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью 112
§ 10. Цепь переменного тока с параллельно соединенными приемниками энергии 114
§ 11. Убытки от низкого cos φ и его компенсации . . 120

Глава VII. Трехфазный переменный ток 123

§ 1. Генерирование трехфазного тока 123
§ 2. Соединение источников тока 126
§ 3. Соединение фаз звездой 128
§ 4. Соединение фаз треугольником 131
§ 5. Мощность трехфазного тока 133

Глава VIII. Измерения электрических величин 135

§ 1. Электрические величины и единицы измерения . . 135
§ 2. Конструкции приборов, их классификация и условные обозначения на шкалах 137
§ 3. Измерение напряжения и тока 142
§ 4. Измерение мощности 146
§ 5. Астатические приборы 148
§ 6. Электрические счетчики и их включение 149
§ 7. Расширение пределов измерения счетчиков . . . 152
§ 8. Измерительные трансформаторы 155
§ 9. Измерительные приборы-логометры 159
§ 10. Приборы для измерения активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей с использованием мостовых схем 161
§ 11. Регистрирующие приборы и осциллографы . . . 162

Глава IX. Силовые трансформаторы 163

§ 1. Принцип действия и устройство трансформатора 163
§ 2. Силовые трехфазные и однофазные трансформаторы 165
§ 3. Номинальная мощность трансформатора 168
§ 4. Номинальное первичное и вторичное напряжения 170
§ 5. Коэффициент трансформации и потери холостого хода. Напряжение короткого замыкания и потери короткого замыкания 173
§ 6. Коэффициент полезного действия трансформатора 176
§ 7. Группа соединения обмоток трансформатора . . . 177
§ 8. Параллельная работа трансформаторов 179
§ 9. Автотрансформаторы 180
§ 10. Электросварочные трансформаторы. Электросварка 182

Глава X. Коллекторные электрические машины 186

§ 1. Устройство машины постоянного тока 186
§ 2. Схемы включения и способы возбуждения генераторов постоянного тока 189
§ 3. Схемы включения двигателей постоянного тока . . 191
§ 4. Автомобильные генераторы постоянного тока. Стартерный двигатель 194
§ 5. Коллекторные машины переменного тока 199
§ 6. Основные правила ухода за коллекторными машинами и их эксплуатации 199

Глава XI. Асинхронные машины 201

§ 1. Устройство асинхронного двигателя 201
§ 2. Технический паспорт электродвигателя. Типы двигателей 203
§ 3. Напряжение сети и схемы соединений обмоток. Определение согласованных выводов (начал и концов) фаз статорной обмотки 207
§ 4. Ток, потребляемый двигателем из сети. Пуск электродвигателя с переключением обмоток статора со звезды на треугольник 211

§ 5. Устройство и схема включения двигателя с фазным ротором 213
§ 6. Скорость вращения асинхронного электродвигателя. Мощность и к. п. д. двигателя. Коэффициент мощности (cos φ) 215
§ 7. Вращающий момент двигателя. Усилие на валу 218
§ 8. Однофазный асинхронный двигатель. Включение трехфазного двигателя в однофазную сеть 221
§ 9. Эксплуатация электродвигателя и уход за ним. Неисправности и их устранение 224
§ 10. Многоскоростные асинхронные электродвигатели 227
§ 11. Асинхронные генераторы 229
§ 12. Асинхронный преобразователь частоты. Асинхронные муфты скольжения 231

Глава XII. Синхронные машины 233

§ 1. Устройство синхронных машин. Способы возбуждения синхронных генераторов 233
§ 2. Основные параметры генераторов 237
§ 3. Параллельная работа генераторов 238
§ 4. Генераторы переменного тока с постоянными магнитами. Магнето 244
§ 5. Синхронные двигатели 245

Глава XIII. Выпрямление переменного тока в постоянный 247

§ 1. Вращающиеся преобразователи тока 247
§ 2. Твердые выпрямители 249
§ 3. Схемы соединений твердых выпрямителей 252
§ 4. Газотронные и ртутные выпрямители 255

Раздел второй

Производство и распределение электрической энергии

Глава XIV. Источники энергоснабжения и графики их нагрузки 258

§ 1. Передача электрической энергии от источников к потребителям 258
§ 2. Схемы соединений электрических станций и подстанций 261
§ 3. Классификация электростанций 263
§ 4. Графики нагрузок источника электроснабжения 269
§ 5. Годовые графики и их анализ 271

Глава XV. Аппаратура управления, используемая в электроустановках 273

§ 1. Рубильники и переключатели 273
§ 2. Пакетные выключатели 275
§ 3. Воздушные автоматические выключатели (автоматы) 276
§ 4. Электромагнитные контакторы переменного тока. Магнитные пускатели 280
§ 5. Комплектные устройства управления 288

§ 6. Общие сведения об аппаратуре высокого напряжения. Разъединители. Выключатели нагрузки . . . 290
§ 7. Высоковольтные автоматические выключатели и приводы к ним 292
§ 8. Общие сведения о выборе аппаратуры управления электроустановками 299

Глава XVI. Релейная защита сельских станций и подстанций. Предохранители низкого и высокого напряжений 302

§ 1. Назначение релейной защиты и предъявляемые к ней требования 302
§ 2. Принцип действия реле, способы включения и воздействия на выключатель 304
§ 3. Основные параметры и характеристики реле . . . 312
§ 4. Релейная защита воздушных электрических сетей и генераторов 314
§ 5. Релейная защита трансформаторов. Защита мощных электродвигателей 319
§ 6. Предохранители низкого и высокого напряжения 320

Глава XVII. Распределительные устройства и трансформаторные подстанции 327

§ 1. Общие сведения. Распределительные устройства до 1000 *в* 327
§ 2. Закрытые высоковольтные распределительные устройства 6—10 *кв* 330
§ 3. Потребительские подстанции 10/0,4 *кв* 332
§ 4. Трансформаторные подстанции 35/10 и 35/6 *кв* . . . 336

Глава XVIII. Регулирование частоты и напряжения генераторов на сельских электростанциях 337

§ 1. Общие сведения. Автоматическое регулирование частоты напряжения и активной мощности 337
§ 2. Автоматические регуляторы напряжения 340
§ 3. Компаундирование возбуждения синхронных генераторов 342
§ 4. Быстродействующая релейная форсировка напряжения возбуждения 344

Глава XIX. Заземления в электроустановках. Меры безопасности в электроустановках. 345

§ 1. Общие сведения. Основные характеристики заземлителей и заземляющих контуров 345
§ 2. Определение сопротивления растеканию заземлителей 350
§ 3. Требования к заземлениям в различных электроустановках 353
§ 4. Особенности устройства заземления распределительных сетей 380/220 *в* 356
§ 5. Классификация помещений по степени опасности поражения людей электрическим током, по условиям окружающей среды и допускаемые напряжения электроустановок 359

§ 6. Защитное отключение 362
§ 7. Индивидуальные средства защиты 363
§ 8. Общие меры безопасности в электрических установках 365
§ 9. Оказание первой помощи пострадавшему от электрического тока 366

Глава XX. Линии и сети. Расчет проводов 371

§ 1. Схемы распределения электрической энергии, применяемые в сельском хозяйстве, и их особенности. Выбор местоположения подстанции 371
§ 2. Требования, предъявляемые к электрическим сетям 374
§ 3. Конструкции опор. Изоляторы для сетей низкого и высокого напряжения 377
§ 4. Типы проводов для электрических линий 381
§ 5. Выбор сечения проводов по условиям нагрева . . 386
§ 6. Выбор плавких вставок предохранителей по условиям нагрева 388
§ 7. Расчет проводов на потерю напряжения 389
§ 8. Основные формулы для расчета проводов на потерю напряжения 396
§ 9. Проверка сети на колебания напряжения при пуске электродвигателей 399
§ 10. Выбор проводов по механической прочности . . . 402
§ 11. Требования к внутренней проводке. 402

Глава XXI. Монтаж внутренних проводок. Элементы строительства и монтажа воздушных и кабельных линий 406

§ 1. Исполнение открытых проводок 406
§ 2. Скрытые проводки 411
§ 3. Соединение, ответвление и оконцевание проводов 414
§ 4. Прокладка и крепление проводов 417
§ 5. Установка осветительной арматуры, выключателей и групповых щитков 422
§ 6. Проводки вне помещений и вводы. Заземления в проводках 427
§ 7. Схемы осветительных цепей 429
§ 8. Рекомендации по монтажу силовых проводок в производственных помещениях 430
§ 9. Элементы монтажа воздушных линий 430
§ 10. Соединения кабелей 433

Глава XXII. Грозозащита в сельских электроустановках . . 435

§ 1. Гроза и ее природа 435
§ 2. Последствия разрядов линейной молнии и поведение человека во время грозы 437
§ 3. Грозозащита строений в сельской местности . . . 441
§ 4. Примеры грозозащиты сельскохозяйственных объектов 449
§ 5. Меры по грозозащите при устройстве наружных антенн приемников и телевизоров в сельской местности 451
§ 6. Грозозащита сельских линий передач и сетей . . . 452
§ 7. Эксплуатация грозозащитных устройств 457

Раздел третий

Применение электрической энергии в сельском хозяйстве для привода машин, освещения, облучения и получения тепла

Глава XXIII. Электропривод в сельском хозяйстве 459
§ 1. Общие сведения об электроприводе. Механические характеристики приводов 459
§ 2. Тепловой режим электродвигателя и выбор его мощности 463
§ 3. Механическая передача от двигателя к рабочей машине 467
§ 4. Основные указания по установке электродвигателя 471
§ 5. Выбор электродвигателя по конструктивному исполнению 473

Глава XXIV. Схемы автоматического управления электроприводами 475
§ 1. Виды схем автоматики и условные обозначения на схемах 475
§ 2. Типовые схемы управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем 477
§ 3. Типовые схемы управления электродвигателем с фазным ротором 481
§ 4. Управление электродвигателями в заданной последовательности 485
§ 5. Технологические датчики и их использование для автоматического управления сельскохозяйственными установками 486

Глава XXV. Использование электрического освещения в сельском хозяйстве 494
§ 1. Спектр электромагнитных колебаний. Основные светотехнические понятия 494
§ 2. Лампы накаливания 500
§ 3. Арматура для ламп накаливания. Прожекторы . 506
§ 4. Люминесцентные лампы 510
§ 5. Сравнение расходов на эксплуатацию ламп накаливания и люминесцентных ламп 516
§ 6. Дуговые ртутные люминесцентные лампы высокого давления (ДРЛ) 517
§ 7. Выбор светильников и их размещение 519
§ 8. Виды и системы освещения 522
§ 9. Простой способ расчета освещения лампами накаливания 525
§ 10. Осветительные сети 527
§ 11. Уход за электроосветительными приборами . . . 530
§ 12. Производственное использование электрического света 531

Глава XXVI. Использование ультрафиолетовых, инфракрасных и других излучений в сельском хозяйстве . . . 536
§ 1. Диапазон ультрафиолетовых лучей. Источники ультрафиолетового излучения 536

§ 2. Нормы эритемного облучения сельскохозяйственных животных и птицы. Эффективность облучения 545
§ 3. Люминесцентный анализ в сельском хозяйстве . . . 548
§ 4. Источники инфракрасных лучей 550
§ 5. Применение инфракрасных лучей 551
§ 6. Общее определение электрокультуры 553
§ 7. Различное использование ионизирующих излучений 555
§ 8. Метод меченых атомов 556

Глава XXVII. Применение электрической энергии для получения тепла 557

§ 1. Перспективы использования электрической энергии для тепловых целей 557
§ 2. Электронагревательные приборы для бытовых целей 559
§ 3. Применение электротепла в производственных процессах 561
§ 4. Электрообогрев в защищенном грунте 563
§ 5. Получение тепла при помощи тепловых насосов. Кондиционеры 568

Алфавитный указатель 571

Прищеп Леонид Георгиевич
Пособие для сельского электрика. Изд 3-е, перераб. и доп. М., изд-во «Колос», 1969.
584 с. (Уч-ки и учеб. пособия для подготовки с.-х. кадров массовой квалификации.)

УДК 621.3+631.371:621.311 (075.8)

Редактор *В. М. Никитина*
Художник *Ю. М. Аратовский*
Художественный редактор *М. Д. Северина*
Технический редактор *В. И. Просвирина*
Корректор *Р. Д. Пронман*

Сдано в набор 8/I 1969 г. Подписано к печати 13/III 1969 г. Т03477. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага тип. № 3. Печ. л. 18,25 (30,66). Уч.-изд. л. 35,16. Изд № 346. Б З № 14 1969 г. № 15. Тираж 100000 экз.
Заказ № 3505. Цена 85 коп.

Издательство «Колос», Москва, К-31, ул. Дзержинского, д. 1/19.

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова
Главполиграфпрома Комитета по печати
при Совете Министров СССР
Москва, Ж-54, Валовая, 28.

85 коп.

ПОСОБИЕ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИКА